

行政院環境保護署

104 年度土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案

重金屬監測離子交換樹脂縮時膠囊 之設計研發

期末報告(定稿本)

主辦單位： 行政院環境保護署

專案執行單位：台灣大學／生物環境系統工程學系所

專案主持人：張尊國 教授

專案執行期間：103 年 12 月 01 日起至
104 年 11 月 30 日止

中華民國 104 年 11 月 印製

「104 年度土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

■修正計畫書 □期中報告

□期末報告

審查意見回覆對照表

計畫年度	104 年度	專案類型	■ 研究計畫 □ 模場試驗	
計畫主持人	張尊國	研究類別	■ 調查 □ 整治 □ 評估 □ 底泥	
計畫名稱	重金屬監測離子交換樹脂縮時膠囊之設計研發			
專案連絡人	林聖淇	連絡專線	02-33663493;0937087673	
政策性審查意見		計畫單位回覆		
依中華民國 103 年 7 月 7 日修正之國內出差旅費報支要點第五項規定「駕駛自用汽（機）車出差者，其交通費得按同路段公民營客運汽車最高等級之票價報支。但不得另行報支油料、過路（橋）、停車等費用；如發生事故，不得以公款支付修理費用及對第三者之損害賠償。」。		悉遵 貴署意見，已於「修正計畫書」中更正經費-差旅費編列細目。		
技術性審查意見		計畫單位回覆		
委員 1： 1. 本研究擬設計研發重金屬監測離子交換樹脂縮時膠囊，此種「被動採樣」方式可克服即時監測水中重金屬離子之困難，獲得長時間排放水或灌溉水重金屬總量之資訊，對於防止重金屬經由灌溉水污染土壤有其助益。 2. 離子交換樹脂之選擇，是本計畫一大重點，只選用一般陽離子交換樹脂，其可能不具選擇性，建議應選用「鉗合性」陽離子交換樹脂，其可選擇性地吸附水中之陽離子型重金屬（包括 Cu、Zn、Ni、Pb、Hg、Cr（III）、Cd）。但對於陰離子型重金屬（包括 As、Cr（VI）），也應選用選擇性之陰離子交換樹脂才能將其吸附，因而樹脂袋應裝填兩種離子交換樹脂才能監測八種重金屬離子。		1. 感謝委員肯定。 2. 同意委員之意見。鉗合樹脂對某些重金屬具有高選擇性。本計畫主要係透過污染物環境指紋比對、空間相關性等方法，對於污染源頭進行掌握。同時，參酌 委員意見，將「縮時記錄膠囊」增加陰離子交換樹脂，除可吸附 As 與 Cr(VI)外，亦可吸附其它陰離子，於後續實驗數據分析結果時提供更多科學性佐證資料，期能更明確掌握污染源頭之分佈，詳見於研究方法與步驟中(附件 7-17 頁)。		

3. 回收後之「交換樹脂」建議以試劑將其萃取後再以 AA 或 ICP 等儀器測定，相較直接以 XRF 測定，可提高其靈敏度以及降低干擾。	3. 同意委員之意見。樣本以 XRF 測定之靈敏度與準確度相較以試劑萃取後用 AA 或 ICP 檢測要來得低。然，本計畫之目的係建立有效監測、成本低廉與分析快速的追蹤污染源的方法。為強化 XRF 測定數據與萃取液含量(以 AA 或 ICP 測定)相關性，本研究採納 委員意見，增列部分完成監測之樹脂樣本以試劑將其萃取後，再以 AA 或 ICP 等儀器測定，進行兩者之間數據的相關性分析，規劃萃取數量與分析金屬種類，詳見研究方法與步驟中(附件 7-22 頁)。
委員 2： 1. 本計畫利用樹脂離子交換為基材做成重金屬監測包，將其投放於監測之區域，一段時間後收回監測包測定所吸附之重金屬，污染源之分布特性即被有效掌握，輔以環境指紋辨識方法之科學證據，可追蹤污染行為人。 2. 由於渠道水含有不同陰陽離子及有機物，對重金屬監測包之效益可能產生影響。故其在應用上可能有其限制。 3. 此方法以定性為主，且無法及時反映污染之排放，可能在應用上時機需再評估。	1. 感謝委員肯定。 2. 同意委員之意見。研究計畫現地場址的環境條件複雜，本研究之樹脂有別傳統使用模式，其「縮時樹脂記錄膠囊」創新設計於開放水體空間中使用，預期將遭遇諸多困難與挑戰。諸如：吸附效率、不同金屬離子對於樹脂的交換競爭、樹脂膠囊受其它雜物阻塞而失效等問題，詳見「研究方法及步驟」之第(五)點預計遭遇之困難所述(附件 7-27 頁)。 3. 同意委員之意見。然，本研究利用「樹脂縮時記錄膠囊」之特性將污染源之分布現況即時有效掌握，輔以環境指紋辨識方法之科學證據，使得污染行為人無所遁形。鎖定廢水違法排放之區域，進一步提供政府相關稽查單位明確目標，期能利用有限稽查資源為土壤環境品質監督做最大化的運用。

委員 3： 1. 本案計畫開啟離子交換型樹脂包，用於監測可能重金屬污染物脂排放，並配合環境指紋辨識方法，以追蹤污染源，有利重金屬污染排放之間控與調查。 2. 研發包括實驗室級高雄、彰化二處污染潛勢高之處，可探討比較樹脂縮時記錄膠囊之應用可行性。 3. 人力費配置、耗材費用高估。	1. 感謝委員肯定。 2. 本計畫因經費調整，初步先以實驗室研發與彰化大竹、和美籍東西二、三圳等高汙染地區為試驗區域，研究方法與步驟中(附件 7-22 頁)。 3. 本計畫核定經費已被減半，故針對人力經費及耗材費用進行調整，詳見附件 7-1 頁。
委員 4： 1. 學理與應用具體可行。 2. 可能遭遇之困難已提出，部分不難以解決，研究成果應可預期。 3. 可朝即時性監測方向研發。	1. 感謝委員肯定。 2. 感謝委員肯定。 3. 感謝委員建議，本計畫針對環保署在彰化地區所建置之水質連續監測站，進行「樹脂縮時記錄膠囊」之投放監測作業，作為後續朝向即時監測方向研發之可行性評估。
委員 5： 1. 預期成果評估與應用建議多加說明，研究成果是否以既有的調查結果驗證?試驗結果對時間與空間的解讀建議說明（同一採樣點可能承受不同來源的排放的匯集）。	1. 悉遵 委員意見，增列預期成果評估與應用建議的說明，詳見附件 7-28 頁。由於監測包簡易價廉，故數量及放置地點會更接近可疑工廠之放流口。另本計畫之監測包會沿現有汙染流域進行佈點及放點，分析結果會同步與環保署在當地所設立之監測站進行同步比對，做為結果驗證。試驗結果對時間與空間解讀的範例說明，詳見附件 7-16 頁。而後續針對時間歷程(縮時監測)及空間解讀(汙染分布)於成果報告中進行研析。

2. IX 系統具競爭吸附的特性（例如：系統中若原本只有重金屬 A，則 IX 交換吸附 A，但之後當系統中又同時有重金屬 A 與 B，若重金屬 B 又更具吸附競爭時，重金屬 B 會將 IX 中的重金屬 A 再次置換出，所以重金屬 A 的證據即可能消失，而誤判污染來源）。 3. 是否須同時配合水質檢測。	2. 樹脂之交換容量大，在被动式吸附狀況下，不易飽和，此高密度聚乙烯樹脂具有良好的韧性、硬度和强度，因此針對污染來源能夠有效追蹤，經初步不同濃度梯度實驗證明，有足夠之吸附容量。 3. 感謝委員建議，本計畫主要針對縮時樹脂成效進行探討，亦會與環保署在彰化地區所建置之水質連續監測站之資料納入與試驗結果數據比較之探討。
綜合性審查意見	計畫單位回覆
原則同意所送計畫，請依審查意見提送修正計畫書。	遵悉 貴署意見，已依審查意見完成「修正計畫書」內容更正。

計畫年度	104 年度	計畫類型	☒ 研究計畫 ☐ 模場試驗
計畫類別	☒ 調查 ☐ 整治復育 ☐ 評估 ☐ 底泥	主持人：張尊國 NO：14	
計畫名稱	重金屬監測離子交換樹脂縮時膠囊之設計研發		
委員審查意見		計畫單位回覆	
委員 1 審查意見： 1. 使用之陽離子交換樹脂對於各個陽離子之吸附，以吸附率來表示並不適宜，建議能以吸附容量來表示。 2. 應以考慮放流水中各種離子之濃度和組成之混合離子溶液來做陽離子交換樹脂吸附陽離子之測試較有意義。 3. 現地試驗所使用之「陰離子交換樹脂」，其材料為何？請補充。 4. 建議使用具重金屬離子「選擇性」之交換樹脂來製備「樹脂縮時紀錄膠囊」，比目前使用非選擇性之陽離子或陰離子交換樹脂，會更有效率。		1. 本研究陽離子交換樹脂對於各個陽離子之吸附另增加以吸附容量來表示(頁 38 至頁 70)。 2. 同意委員意見。然本計畫係初次利用陽離子交換樹脂吸附灌溉排水渠道水體中所含的陽離子。實驗室吸附試驗目的希冀瞭解在短時間接觸時，陽離子交換樹脂吸附重金屬效果與現地可適用性最佳化之可行性評估，以利後續進行相關性比較與探討。再者，陽離子交換樹脂商品規格所提供之交換容量(2 eq L ⁻¹)足夠作為在監測期間吸附違法偷排於水體之重金屬分佈特性。 3. 現地試驗所使用之陰離子交換樹脂基本性質已增列至 4.5 節(頁 27)。 4. 同意委員觀點。本研究使用之陰、陽離子交換樹脂為非選擇性之樹脂，金屬表面電鍍廢水含有多種重金屬(銅、鋅、鐵、鉻、鎳與錳等)，非單一種類重金屬的汙染。初期監測數據顯示研究區域內廠家在監測期間確實發生違法排放廢汙水於河道中之情事，其污染特性(重金屬含量與種類)已紀錄在「樹脂縮時紀錄膠囊」內，相關研究成果將於期末報告說明。	

**行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究及模場試驗專案」
期中報告初審意見對照表(續一)**

計畫年度	104 年度	計畫類型	☒ 研究計畫 ☐ 模場試驗
計畫類別	☒ 調查 ☐ 整治復育 ☐ 評估 ☐ 底泥	主持人：張尊國 NO：14	
計畫名稱	重金屬監測離子交換樹脂縮時膠囊之設計研發		
委員審查意見		計畫單位回覆	
委員 2 審查意見： 1. 本研究研發「樹脂縮時記錄膠囊」，利用樹脂離子交換為基材做成重金屬監測包，將其投放於監測之區域，一段時間後收回監測包測定所吸附之重金屬，並分析汙染源的分布特性，輔以環境指紋辨識方法之證據，達到以科學證據做為法律求償責任之認定。 2. 本報告文獻收集及相關資料收集完整。 3. 建議後續工作可補充如何進行實場應用。 4. 建議針對操作成本進行評估，並和目前常用之方法進行比較。 5. 可說明本研究其實用性和應用價值，並說明使用之限制。		1. 感謝委員肯定。 2. 感謝委員肯定。 3. 遵悉委員意見。實場應用之相關內容已增列至 5.6 節(頁 93)。 4. 遵悉委員意見。將於期末報告增列操作成本之評估，同時將目前常用之水質連續監測方法納入比較。 5. 遵悉委員意見。本研究之實用性和應用價值之初步內容說明已增列至 5.5 節(頁 91 & 頁 92)。「樹脂縮時記錄膠囊」之使用限制將參酌現地實驗數據之結果後，於期末報告一併進行探討。	

行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究及模場試驗專案」
期中報告初審意見對照表(續二)

計畫年度	104 年度	計畫類型	☒ 研究計畫 ☐ 模場試驗
計畫類別	☒ 調查 ☐ 整治復育 ☐ 評估 ☐ 底泥	主持人：張尊國 NO：14	
計畫名稱	重金屬監測離子交換樹脂縮時膠囊之設計研發		
委員審查意見		計畫單位回覆	
委員 4 審查意見： 1. 確實已依計畫項目執行。 2. 樹脂縮時記錄膠囊已完成實驗室及野外現地測試，結果如預期效益。可能在未來可提供偷排行為之證據。 3. 已規劃後半年研究工作。		1. 感謝委員肯定。 2. 感謝委員肯定。 3. 感謝委員肯定。	
委員 5 審查意見： 1. 執行現況、流程及方法的說明具體詳盡。 2. 計畫後續執行工作項目及內容已於第5.6節簡要說明。 3. 計畫執行進度與預定進度相符，已有初步的成果。 4. 本計畫宜就樣品採樣點（樹脂放置）的布點與意義加以詳細說明。 5. 現場的競爭吸附的效應建議評估。 6. 與接觸時間（縮時膠囊）的關係建議討論。 7. 後續的處理（如再生脫附...等等）建議說明。		1. 感謝委員肯定。 2. 感謝委員肯定。 3. 感謝委員肯定。 4. 遵悉委員意見。本計畫之樣品採樣點（樹脂放置）的佈點與意義說明已增列至 5.3 節(頁 81)。 5. 遵悉委員意見。「樹脂縮時記錄膠囊」之現場競爭吸附的效應之建議與評估將參酌現地實驗數據之結果後，於期末報告一併進行探討。 6. 遵悉委員意見。「樹脂縮時記錄膠囊」與水體接觸時間之關係將參酌現地實驗數據之結果後，於期末報告一併進行探討。 7. 本計畫針對「樹脂縮時記錄膠囊」之後續的處理（如再生脫附...等等）建議說明已增列至 5.3 節(頁 82)。	

行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究及模場試驗專案」
 期中報告初審意見對照表(續三)

計畫年度	104 年度	計畫類型	☒ 研究計畫 ☐ 模場試驗
計畫類別	☒ 調查 ☐ 整治復育 ☐ 評估 ☐ 底泥	主持人：張尊國 NO：14	
計畫名稱	重金屬監測離子交換樹脂縮時膠囊之設計研發		
委員審查意見		計畫單位回覆	
本署審查意見： 1. 請檢附缺失項目自評表。		1. 依照辦理。	

計畫年度	104 年度	計畫類型	☒ 研究計畫 ☐ 模場試驗
計畫類別	☒ 調查 ☐ 整治復育 ☐ 評估 ☐ 底泥	主持人：張尊國 NO：14	
計畫名稱	重金屬監測離子交換樹脂縮時膠囊之設計研發		
委員審查意見		計畫單位回覆	
委員 1 審查意見： 1. 因所使用之陽離子樹脂非屬 Chelating Resin，對重金屬陽離子不具選擇性，所以 Ca ²⁺ 離子占據大部分之陽離子樹脂之吸附位置。因而有些微量且值得關切之重金屬陽離子可能無法被偵測到（例如：Cd ²⁺ ）或者其濃度會被低估。建議後續應選用鉗合性離子交換樹脂，才能適用監測關切之重金屬濃度。 2. 同樣地，因所使用之陰離子交換樹脂對於關切之重金屬（例如：As、Cr）不具選擇性，所以陰離子樹脂上所吸附之陰離子主要為 SO ₄ ²⁻ 和 Cl ⁻ ，可能會低估 As 或 Cr 等陰離子型態重金屬濃度。建議後續應選用選擇性之陰離子交換樹脂，才能適用於監測關切之陰離子型態之重金屬濃度。		1. 同意委員意見。鈣與鋁雖不是關注的污染物質，但其被吸附卻是有助於估算通量。本研究初步成果已證實在開放水體中陽離子交換樹脂對於金屬離子的吸附效果顯著，後續如欲針對特定微量元素進行監測，選用適合鉗合性離子交換樹脂是未來研究方向的重點工作。 2. 同意委員意見。本研究初步成果亦已證實在開放水體中陰離子交換樹脂對於含金屬元素之錯離子的吸附效果明顯，後續如欲針對特定陰離子型態含金屬元素之錯離子進行監測，選用適合鉗合性離子交換樹脂是未來研究方向的重點工作。	
委員 2 審查意見： 1. 本研究透過研發設計「樹脂縮時記錄膠囊」之發想提供另類環境監測之思維，利用有限稽查資源為土壤環境品質監督做最大化的運用。 2. 本研發針對污染源之分布特性可以有效掌握，輔以環境指紋辨識方法之科學證據，達到以科學證據做為法律求償責任之認定。 3. 本報告文獻收集及相關資料收集完整，成果具實場之應用價值。 4. 計畫執行良好，文獻及方法說明具體詳盡，整體研究成果符合預期。		1. 感謝委員肯定。 2. 感謝委員肯定。 3. 感謝委員肯定。 4. 感謝委員肯定。	

**行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究及模場試驗專案」
期末報告初審意見對照表(續一)**

計畫年度	104 年度	計畫類型	☒ 研究計畫 ☐ 模場試驗
計畫類別	☒ 調查 ☐ 整治復育 ☐ 評估 ☐ 底泥	主持人：張尊國 NO：14	
計畫名稱	重金屬監測離子交換樹脂縮時膠囊之設計研發		
委員審查意見		計畫單位回覆	
委員 3 審查意見： 未參與審查作業。			
委員 4 審查意見： 1. 期末報告格式均依規定撰寫，符合規定。 2. 研究項目及進度符合計畫內容，已達到計畫目標。 3. 初步成果已達預期。重金屬監測離子交換樹脂縮時膠囊之設計研發於彰化東西二圳灌區，為重金屬在環境指紋辨識污染源確實有效可行。ITrax檢測值與ICP測值有很好相關性。 4. 未來可依初步成果應用於污染實場之操作試驗之可行性。		1. 感謝委員肯定。 2. 感謝委員肯定。 3. 感謝委員肯定。 4. 感謝委員肯定。本計畫團隊將以研究成果為基礎，致力規劃應用於污染實場之操作試驗之可行性方案。	
委員 5 審查意見： 1. 本研究屬於初期實驗室研究階段，研究內容&討論與建議仍屬初期的討論，就研究成果的實務應用性而言，仍未具有實務可行性。建議提供一具有實務操作可能性的操作流程，以及因應現場水質與環境因子條件的不同所需的因應作為(例如：如何控制有效的質傳，而不因質傳限制了金屬物質的吸附而誤導觀測結果...等等)。		1. 感謝委員肯定。本計畫團隊將以研究成果為基礎，致力規劃後續應用於污染實場之操作試驗之可行性方案。	

計畫年度	104 年度	計畫類型	☒ 研究計畫 ☐ 模場試驗
計畫類別	☒ 調查 ☐ 整治復育 ☐ 評估 ☐ 底泥	主持人：張尊國 NO：14	
計畫名稱	重金屬監測離子交換樹脂縮時膠囊之設計研發		
委員審查意見		計畫單位回覆	
委員 5 審查意見： 2. 5.6 節的第 8 項：建議有其他的數據佐證。 3. 若有質傳或現場環境因子的干擾，本計畫所得的結論似乎無法顯示具有”...即時連續監測...”的功能，此一計畫目標的可能性建議說明。(例如：水中其它陽離子的干擾...)(甚至是喪失應有的吸附力而導致誤解)(如期初意見所示：競爭吸附)...等等)。 4. 只要有干擾，就無法克服”...紀錄污染源排放...”，若如此，則應評估本計畫成果在實務上的可信度 (例如：事實上有污染源但不一定被檢測到的污判...等)。 5. 本計畫宜就實際觀察所得檢討計畫目標的達成度。		2. 陰離子交換樹脂所吸附之離子狀態應為陰離子，但是 XRF 檢測數據卻發現有其他重金屬陽離子存在(如 A45 與 B29，如表 5.10)，包含的元素有錳、鐵、銅與鋅等顯示有異常吸附現象。本計畫監測點位之陰離子交換樹脂濃度並無法達到使用 XPS 分析其元素鍵結型態所需濃度等級(10%以上)之要求。本研究團隊已針對推論結果設計實驗方法後續進行深入研究。 3. 同意委員所述，然「樹脂縮時記錄膠囊」原始發想係希望提供一種凡走過必留下痕跡的概念。如欲減低其他陽離子干擾、樹脂交換能力喪失、競爭吸附等因素之影響，本團隊建議陰、陽離子「樹脂縮時記錄膠囊」連續監測時間以不超過 7 天為限。在本計畫現地監測資料結果(如 A34 點位,P72-P73)顯示當有污染行為發生時，「樹脂縮時記錄膠囊」可鎖定廢水違法排放之區域，進一步提供政府相關稽查單位明確目標，後續利用有限稽查資源為土壤環境品質監督做最大化的運用。 4. 同意委員所述，現地環境因子影響複雜且多變，在實務上的可信度，僅能就較嚴重的污染行為進行監測，並無法達到鎖定監測區域所有污染源的要求。增列於 5.6 節的第 6 項。 5. 遵悉委員意見，已於 5.4 節根據現地監測數目與資料，說明達成計畫目標的範疇。	

行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究及模場試驗專案」
 期末報告初審意見對照表(續三)

計畫年度	104 年度	計畫類型	☒ 研究計畫 ☐ 模場試驗
計畫類別	☒ 調查 ☐ 整治復育 ☐ 評估 ☐ 底泥	主持人：張尊國 NO：14	
計畫名稱	重金屬監測離子交換樹脂縮時膠囊之設計研發		
委員審查意見		計畫單位回覆	
委員 5 審查意見： 6. 計畫執行進度與預定進度相符。 7. 進度並無落後。 8. 執行現況、研究流程及方法說明具體。		6. 感謝委員肯定。 7. 感謝委員肯定。 8. 感謝委員肯定。	

行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究及模場試驗專案」
 期末報告初審意見對照表(續四)

計畫年度	104 年度	計畫類型	☒ 研究計畫 ☐ 模場試驗
計畫類別	☒ 調查 ☐ 整治復育 ☐ 評估 ☐ 底泥	主持人：張尊國 NO：14	
計畫名稱	重金屬監測離子交換樹脂縮時膠囊之設計研發		
委員審查意見		計畫單位回覆	
本署審查意見： 1. 請檢附缺失項目自評表。		1. 依照辦理。	

專案基本資料表

專案性質		☒ 實驗性質 ☐ 非實驗性質		專案類別(單選)		☒ 研究專案 ☐ 模場試驗	
研究主題		☒ 調查 ☐ 整治 ☐ 評估 ☐ 底泥					
申請機構系所		國立台灣大學生物環境系統工程學系					
機構地址		台北市大安區羅斯福路四段1號					
計畫主持人		張 尊 國		職等/職稱		教 授	
協同主持人				職等/職稱			
專案 名稱	中文	重金屬監測離子交換樹脂縮時膠囊之設計研發					
	英文	Design of Time Lapse Capsule for Heavy Metals Monitoring by Using Ion Exchange Resin					
	關鍵字	離子交換樹脂(Ion Eexchange Resin)、重金屬(Heavy Metal)、汙染監測(Pollution Monitoring)					
執行期程		自 民 國 1 0 3 年 1 2 月 0 1 日 起 至 民 國 1 0 4 年 1 1 月 3 0 日 止					
計畫主持人		姓名：張尊國 E-mail：tknchang@ntu.edu.tw				專線：02-33663466 手機：0916033178	
專任助理		姓名：林聖淇 E-mail：d95622007@ntu.edu.tw				專線：02-33663493 手機：0937087673	
經 費 分 析 表		專 案 預 估 經 費		金 額		編 列 說 明	
		1.	人事費用		454,384	(1~5 項相加之 50%為限)	
		2.	貴重儀器使用含維護費		10,000	(與計畫實驗相關)	
		3.	消耗性器材與主要費用		335,900	(與計畫主體相關)	
		4.	其它研究相關費用		59,200	(差旅與租賃費用)	
		5.	雜項費用		49,616	(1~6 項相加之 5%為限)	
		6.	行政管理費		90,900	(1~5 項相加之 10%為限)	
				專案計畫申請總金額		1,000,000	

專案主持人(簽名及蓋章)： 張尊國 

日期： 104/11/22

行政院環境保護署土壤及地下水污染整治基金管理會
土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案
104 年度專案成果績效自評表

一、專案基本資料

填表日期：104 年 10 月 19 日

專案性質	☒ 實驗性質 ☐ 非實驗性質	專案類別	☒ 研究專案 ☐ 模場試驗
研究主題	☒ 調查 ☐ 整治 ☐ 評估 ☐ 底泥		
申請機構系所	台灣大學生物環境系統工程學系	計畫主持人	張尊國 教授
專案名稱	重金屬監測離子交換樹脂縮時膠囊之設計研發		
專案執行期程	☐ 申請階段 ☐ 期中 ☒ 期末		

二、成果績效自評

「計畫總預估數」應與計畫審查核定值相符，請執行單位依實際達成之量化成果填寫於「結案達成數」欄位中。

(一) 學術面

項目 \ 目標達成程度			申請 預估數	期中 達成數	期末 達成數	結案 達成率	備註 (說明未達成原因或學術 產出發表日期、發表處、發 表名稱、影響指數等)
A 學 術 產 出 及 活 動	1.國內投稿 (篇數)	(1)論文	1	0	0		
		(2)研討會論文	1	0	1		
	2.國外投稿 (篇數)	(1)期刊論文	1	0	1		
		(2)研討會論文	1	0	0		
	3.報告 (篇數)	(1)技術報告					
		(2)研究報告					
	4.專著 (本數)						
	5.辦理學術 會議(場數)	(1)研討/說明會					
		(2)成果發表會					
		(3)論壇					
6.研發改良 技術(項數)	(1)已開發技術						
	(2)技術平台						
B 人 才 培 育	7.研發人員 (人數)	(1)碩士	1	0	2		
		(2)博士	1	0	1		
	8.研究團隊 (個數)	(1)跨領域團隊					
		(2)跨國團隊					
		(3)跨機構團隊					
		(4)形成研究中心					
		(5)形成實驗室					
9.其他指標 (請自行命名)		(請自填)					

(二) 產業面

項目				目標達成程度		申請 預估數	期中 達成數	期末 達成數	結案 達成率	備註 (說明未達成原因或專利、 技術轉移相關詳細資料)
A 智慧財產權	1.專利 (件數)	已核准	發明							
			新型/設計							
			合計							
		申請中	發明	1	0	1				
			新型/設計							
			合計							
B 研發技術轉移	2.先期技術 成果移轉	件數								
		授權金(仟元)								
		衍生利益金(仟元)								
	3.技術移轉 (專利)	件數								
		授權金(仟元)								
		衍生利益金(仟元)								
	4.技術移轉 (應用技術)	件數								
		授權金(仟元)								
		衍生利益金(仟元)								
	5.可移轉 產業技術	(1)技術(件數)								
		(2)品種/系(件數)								
6.其他指標 (請自行命名)		(請自填)								

(三) 政策面

項目 \ 目標達成程度			申請預 估數	期中 達成數	期末 達成數	結案 達成率	備註 (說明未達成原因或 其他詳細資料)
A 服務 便民	1.技術服務	次數					
		收入(仟元)					
	2.諮詢服務	次數					
		收入(仟元)					
B 支 援 合 作	3.協助政府 制定 (件數)	(1)政策					
		(2)法規					
		(3)規範					
		(4)標準					
4.其他指標 (請自行命名)		(請自填)					

三、請依學術成就、技術創新、經濟效益、社會影響等方面，評估研究成果對現況或本署之學術或應用價值。（簡述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性，500 字為限）

台灣地區因事業之廢污水放流系統與農業之灌溉用水系統未完全分離，使得灌溉用水含污染物質，透過河川渠道遭受污染的農地達危害與預警管制系統等級區域約占全國農地 2.65%，約 1.5 萬公頃列入高污染潛勢範圍。受重金屬污染農地係因長期累積多重污染源所致，污染行為人難以追查，使得污染狀態長期以來無法有效改善。鑑於偷排廢水事件含有不定時、延時短、污染濃度高且地點廣泛等特性，故偷排行為難以防範。在政府稽查資源有限的條件下，建立有效監測、成本低廉與分析快速的追蹤污染源的方法實為當務之急。「樹脂縮時記錄膠囊」之研發針對污染源的分布特性可以有效掌握，輔以環境指紋辨識方法之科學證據，污染行為人無所遁形，達到以科學證據做為法律求償責任之認定。其優點是監測成本低廉、效率高與分析快速，加上紀錄污染源排放的敏感度(重金屬濃度)與位置(移動性低)遠高於底泥所反應的現況。本研究透過研發設計「樹脂縮時記錄膠囊」之發想提供另類環境監測之思維，利用有限稽查資源為土壤環境品質監督做最大化的運用。

摘要

鑑於偷排廢水事件含有不定時、延時短、污染濃度高且地點廣泛等特性，故偷排行為難以防範。連續監測成本高昂，因此違法行為始終難以全面掌控。本研究利用樹脂離子交換為基材做成重金屬監測包(稱之為「樹脂縮時記錄膠囊」)，大量將其投放於監測之區域，一段時間後收回監測包測定所吸附之重金屬，污染源的分布特性即被有效掌握，輔以環境指紋辨識方法之科學證據，污染行為人無所遁形。本計畫研發「樹脂縮時記錄膠囊」之架構分為實驗室與現地試驗兩個方向進行。實驗室試驗結果顯示陽離子交換樹脂與水體接觸的通量越大，其吸附重金屬的效率越好；兩者接觸時間達 30 分鐘時，陽離子交換樹脂對重金屬的吸附效率可達 40% 以上；在離子交換樹脂之交換容量未達飽和的情況下，重金屬濃度的高低對離子交換樹脂吸附效率的多寡並無顯著差異。針對現地試驗部分，「樹脂縮時記錄膠囊」投放在彰化縣東西二、三圳灌溉區域，涵蓋面積 8.8 平方公里。監測時間最長達 21 天，期間共回收 404 個陽離子樹脂膠囊(回收率 89.2%)與 28 個陰離子樹脂膠囊(回收率 93.9%)。根據監測膠囊回收數據顯示，背景元素監測資料特性會隨著時間的累積，水體中因一直存在穩定含量，讓交換形式持續進行，導致背景元素含量有增加的趨勢，以鈣跟鎂為主；另類則是以人為形式(如工廠排放、農業施肥等)加諸於環境水體之中，在特定時間與地點的大量排放，使得「樹脂縮時記錄膠囊」中重金屬元素在特定點位異常增加。本研究透過研發「樹脂縮時記錄膠囊」發展為環境指紋辨識的方法是有效且可行，能夠協助鎖定廢水違法排放之區域，提供政府相關單位能利用有限稽查資源為土壤環境品質監督做最佳把關。

Abstract

It is difficult to block wastewater illegal discharge behavior owing to the high cost of continuous monitoring, and therefore illegal situation always difficult to fully control. In this study, the heavy metal monitoring package (called "Resin Lapse recording capsule ") made of ion-exchange resin as a substrate was developed. It is an effective monitor device with low cost and rapidly analytic surveillance would be a way to suppress illegal emissions under the limited resource. The goals of this project were divided into the laboratory and the field experiment on two trails direction to carry on. The laboratory experiments to show that the cation exchanges a flux of resin and water body contact affect the adsorb efficiency of heavy metals. The contact time with the heavy metal and cation exchange resin in solution for 30 minutes, cation exchange resin adsorption efficiency of heavy metals can reached 40%. Under the unsaturated condition for the commutation capacity in the ion exchange resin, the level of concentration of heavy metals to the ion exchange resin is no significant difference in the amount of adsorption efficiency. For the field experiment, launch and recovery operations for "Resin Lapse Recording Capsule" had been completed. There were 151 points, covering an area of approximately 8.8 square kilometers. Each site placed three capsules for monitoring time covering 21 days with interval of 7 days. 453 cation resin capsules and 30 anion resin capsules were totally launched in the research areas. After the monitoring, cationic resin capsule recovery was 89.6%; anion resin capsule recovery was 93.9%. Finally, "Resin Lapse Recording Capsule" was carried out to be one of the environmental fingerprint recognitions and also provided the official inspector to identify the specific areas of the illegal pollution emissions under the limited resource condition.

目次

一、前言	1
二、研究目的	3
三、文獻探討	4
3.1 背景說明	4
3.2 離子交換樹脂	9
四、研究方法與過程	13
4.1 研究架構	13
4.2 研究區域	15
4.3 研究方法	18
4.4 「樹脂縮時紀錄膠囊」研發	20
4.5 實驗室設計	25
4.6 實驗室分析方法	32
4.7 工作進度甘特圖	36
五、結果與討論	38
5.1 樹脂吸附實驗	38
5.2 樹脂的重金屬濃度與 XRF 之關係	49
5.3 「樹脂縮時紀錄膠囊」現地試驗	56
5.4 「樹脂縮時記錄膠囊」監測結果	66
5.5 SEM 與 EDS 分析	74
5.6 結論與建議	76
六、參考文獻	79

圖次

圖3.1	離子交換樹脂交換反應平衡示意圖.....	9
圖3.2	陰離子交換樹脂.....	11
圖3.3	陽離子交換樹脂.....	11
圖4.1	實驗室試驗研究流程圖.....	13
圖4.2	現地試驗研究流程圖.....	14
圖4.3	彰化縣東西二、三圳灌排分布圖.....	16
圖4.4	「樹脂縮時記錄膠囊」投放於調查場址與污染源追蹤示意圖.....	19
圖4.5	「樹脂記錄膠囊」成品示意圖.....	21
圖4.6	「樹脂縮時記錄膠囊」類長方體雙包示意圖.....	22
圖4.7	「樹脂縮時記錄膠囊」外框底座示意圖.....	22
圖4.8	樹脂膠囊製作.....	23
圖4.9	樹脂膠囊裝填離子交換樹脂.....	23
圖4.10	「樹脂縮時記錄膠囊」製作流程示意圖.....	24
圖4.11	陽離子交換樹脂反應示意圖.....	25
圖4.12	陰離子交換樹脂反應示意圖.....	25
圖4.13	鈉型陽離子交換樹脂外觀.....	26
圖4.14	氯型陰離子交換樹脂外觀.....	27
圖4.15	實驗室用「樹脂縮時記錄膠囊」之初步設計外觀.....	28
圖4.16	混凝攪拌實驗機攪拌水體模擬渠道水流示意圖.....	29
圖4.17	樹脂吸附實驗靜置示意圖.....	30
圖4.18	X-射線螢光光譜儀(I-Trax).....	32
圖4.19	X-射線螢光光譜儀測定原理.....	33
圖4.20	I-Trax 樣本專用塑膠盒.....	33
圖 5.1(a1)	陽離子交換樹脂對鋅的吸附率(微量).....	41
圖 5.1(a2)	陽離子交換樹脂對鋅的吸附容量(微量).....	41
圖 5.1(b1)	陽離子交換樹脂對鋅的吸附率(低濃度).....	41
圖 5.1(b2)	陽離子交換樹脂對鋅的吸附容量(低濃度).....	41

圖 5.1(c1) 陽離子交換樹脂對鋅的吸附率(中濃度)	41
圖 5.1(c2) 陽離子交換樹脂對鋅的吸附容量(中濃度)	41
圖 5.1(d1) 陽離子交換樹脂對鋅的吸附率(高濃度).....	41
圖 5.1(d2) 陽離子交換樹脂對鋅的吸附容量(高濃度).....	41
圖 5.2(a1) 陽離子交換樹脂對鉛的吸附率(微量).....	42
圖 5.2(a2) 陽離子交換樹脂對鉛的吸附容量(微量).....	42
圖 5.2(b1) 陽離子交換樹脂對鉛的吸附率(低濃度).....	42
圖 5.2(b2) 陽離子交換樹脂對鉛的吸附容量(低濃度).....	42
圖 5.2(c1) 陽離子交換樹脂對鉛的吸附率(中濃度).....	42
圖 5.2(c2) 陽離子交換樹脂對鉛的吸附容量(中濃度).....	42
圖 5.2(d1) 陽離子交換樹脂對鉛的吸附率(高濃度).....	42
圖 5.2(d2) 陽離子交換樹脂對鉛的吸附容量(高濃度).....	42
圖 5.3(a1) 陽離子交換樹脂對銅的吸附率(微量).....	43
圖 5.3(a2) 陽離子交換樹脂對銅的吸附容量(微量).....	43
圖 5.3(b1) 陽離子交換樹脂對銅的吸附率(低濃度).....	43
圖 5.3(b2) 陽離子交換樹脂對銅的吸附容量(低濃度).....	43
圖 5.3(c1) 陽離子交換樹脂對銅的吸附率(中濃度).....	43
圖 5.3(c2) 陽離子交換樹脂對銅的吸附容量(中濃度).....	43
圖 5.3(d1) 陽離子交換樹脂對銅的吸附率(高濃度).....	43
圖 5.3(d2) 陽離子交換樹脂對銅的吸附容量(高濃度).....	43
圖 5.4(a1) 陽離子交換樹脂對鉻的吸附率(微量).....	44
圖 5.4(a2) 陽離子交換樹脂對鉻的吸附容量(微量).....	44
圖 5.4(b1) 陽離子交換樹脂對鉻的吸附率(低濃度).....	44
圖 5.4(b2) 陽離子交換樹脂對鉻的吸附容量(低濃度).....	44
圖 5.4(c1) 陽離子交換樹脂對鉻的吸附率(中濃度).....	44
圖 5.4(c2) 陽離子交換樹脂對鉻的吸附容量(中濃度).....	44
圖 5.4(d1) 陽離子交換樹脂對鉻的吸附率(高濃度).....	44
圖 5.4(d2) 陽離子交換樹脂對鉻的吸附容量(高濃度).....	44
圖 5.5(a1) 陽離子交換樹脂對鎳的吸附率(微量).....	45

圖 5.5(a2) 陽離子交換樹脂對鎳的吸附容量(微量).....	45
圖 5.5(b1) 陽離子交換樹脂對鎳的吸附率(低濃度).....	45
圖 5.5(b2) 陽離子交換樹脂對鎳的吸附容量(低濃度).....	45
圖 5.5(c1) 陽離子交換樹脂對鎳的吸附率(中濃度).....	45
圖 5.5(c2) 陽離子交換樹脂對鎳的吸附容量(中濃度).....	45
圖 5.5(d1) 陽離子交換樹脂對鎳的吸附率(高濃度).....	45
圖 5.5(d2) 陽離子交換樹脂對鎳的吸附容量(高濃度).....	45
圖 5.6(a1) 陽離子交換樹脂對鈣的吸附率(微量).....	46
圖 5.6(a2) 陽離子交換樹脂對鈣的吸附容量(微量).....	46
圖 5.6(b1) 陽離子交換樹脂對鈣的吸附率(低濃度).....	46
圖 5.6(b2) 陽離子交換樹脂對鈣的吸附容量(低濃度).....	46
圖 5.6(c1) 陽離子交換樹脂對鈣的吸附率(中濃度).....	46
圖 5.6(c2) 陽離子交換樹脂對鈣的吸附容量(中濃度).....	46
圖 5.6(d1) 陽離子交換樹脂對鈣的吸附率(高濃度).....	46
圖 5.6(d2) 陽離子交換樹脂對鈣的吸附容量(高濃度).....	46
圖 5.7(a1) 陽離子交換樹脂對錳的吸附率(微量).....	47
圖 5.7(a2) 陽離子交換樹脂對錳的吸附容量(微量).....	47
圖 5.7(b1) 陽離子交換樹脂對錳的吸附率(低濃度).....	47
圖 5.7(b2) 陽離子交換樹脂對錳的吸附容量(低濃度).....	47
圖 5.7(c1) 陽離子交換樹脂對錳的吸附率(中濃度).....	47
圖 5.7(c2) 陽離子交換樹脂對錳的吸附容量(中濃度).....	47
圖 5.7(d1) 陽離子交換樹脂對錳的吸附率(高濃度).....	47
圖 5.7(d2) 陽離子交換樹脂對錳的吸附容量(高濃度).....	47
圖 5.8(a1) 陽離子交換樹脂對鈦的吸附率(微量).....	48
圖 5.8(a2) 陽離子交換樹脂對鈦的吸附容量(微量).....	48
圖 5.8(b1) 陽離子交換樹脂對鈦的吸附率(低濃度).....	48
圖 5.8(b2) 陽離子交換樹脂對鈦的吸附容量(低濃度).....	48
圖 5.8(c1) 陽離子交換樹脂對鈦的吸附率(中濃度).....	48
圖 5.8(c2) 陽離子交換樹脂對鈦的吸附容量(中濃度).....	48

圖 5.8(d1) 陽離子交換樹脂對鈦的吸附率(高濃度).....	48
圖 5.8(d2) 陽離子交換樹脂對鈦的吸附容量(高濃度).....	48
圖 5.9(a) 微量鋅(*0.1)對應 ITrax 數據.....	50
圖 5.9(b) 低濃度鋅(*1)對應 ITrax 數據.....	50
圖 5.9(c) 中濃度鋅(*10)對應 ITrax 數據.....	50
圖 5.9(d) 高濃度鋅(*20)對應 ITrax 數據.....	50
圖 5.10 含鋅的樹脂對應 ITrax 數據關係圖.....	52
圖 5.11 含鋅的樹脂對應 ITrax 數據對數關係圖(以 10 為底).....	52
圖 5.12 含銅的樹脂對應 ITrax 數據對數關係圖(以 10 為底).....	52
圖 5.13 含鉻的樹脂對應 ITrax 數據對數關係圖(以 10 為底).....	52
圖 5.14 含鉛的樹脂對應 ITrax 數據對數關係圖(以 10 為底).....	53
圖 5.15 含鎳的樹脂對應 ITrax 數據對數關係圖(以 10 為底).....	53
圖 5.16 含鈣的樹脂對應 ITrax 數據對數關係圖(以 10 為底).....	53
圖 5.17 含錳的樹脂對應 ITrax 數據對數關係圖(以 10 為底).....	53
圖 5.18 含鈦的樹脂對應 ITrax 數據對數關係圖(以 10 為底).....	54
圖 5.19 放置監測膠囊現勘點位(A42; 104-03-03).....	56
圖 5.20 「樹脂縮時記錄膠囊」現地試驗時程圖.....	57
圖 5.21 放置「陽離子樹脂縮時記錄膠囊」點位渠道現況示意圖.....	58
圖 5.22 放置「陰離子樹脂縮時記錄膠囊」點位渠道現況示意圖.....	58
圖 5.23「樹脂縮時記錄膠囊」放樣位置及規劃路線.....	59
圖 5.24A01「樹脂縮時記錄膠囊」放樣過程(104.03.17).....	59
圖 5.25「樹脂縮時記錄膠囊」放置情形.....	61
圖 5.26「樹脂縮時記錄膠囊」第一次收樣情形.....	62
圖 5.27「樹脂縮時記錄膠囊」第二次收樣情形.....	63
圖 5.28「樹脂縮時記錄膠囊」第三次收樣情形.....	64
圖 5.29「樹脂縮時記錄膠囊」洗滌示意圖.....	65
圖 5.30「樹脂縮時記錄膠囊」靜置風乾示意圖.....	65
圖 5.31 在不同收樣類別中其目標元素峰度值中位數盒形圖.....	69
圖 5.31 在不同收樣類別中其目標元素峰度值中位數盒形圖(續 1).....	70

圖 5.32 監測點位繫留作業與回收作業現場操作情況.....	73
圖 5.33 陰離子交換樹脂 SEM 外觀顯示圖.....	74
圖 5.34 陰離子交換樹脂 EDS 外觀顯示圖.....	75

表次

表3.1	台灣與國外地區事業廢污水偷排事件一覽表.....	5
表3.2	台灣地區事業廢棄污水偷排事件統計表.....	8
表3.3	彰化地區灌溉水質數據一覽表.....	8
表4.1	彰化農田水利會灌溉系統所屬圳路灌溉面積與用水量.....	15
表4.2	彰化農田水利會灌溉系統與圳路.....	17
表4.3	鈉型陽離子交換樹脂之基本性質.....	26
表4.4	氯型陰離子交換樹脂之基本性質.....	27
表4.5	重金屬配製濃度一覽表.....	31
表4.6	實驗室水體取樣時間一覽表.....	31
表4.7	實驗分析儀器.....	34
表4.8	實驗藥品一覽表.....	35
表4.9	工作進度甘特圖.....	36
表5.1	樹脂理論濃度與 ITrax 檢測值關係一覽表.....	49
表5.2	實驗室樹脂吸附試驗 ITrax 檢測分析結果一覽表.....	51
表5.3	陽離子樹脂吸附目標元素濃度與 I-Trax 峰度值線性回歸一覽表...	55
表5.4	陰、陽離子「樹脂縮時記錄膠囊」放樣及收樣統計表.....	60
表5.5	陽離子樹脂膠囊回收作業統計表.....	60
表5.6	「陽離子樹脂縮時記錄膠囊」現地監測結果敘述統計表(7 天).....	67
表5.7	「陽離子樹脂縮時記錄膠囊」現地監測結果敘述統計表(14 天).....	67
表5.8	「陽離子樹脂縮時記錄膠囊」現地監測結果敘述統計表(21 天).....	67
表5.9	陽離子空白樹脂(D00)與監測點位目標元素 XRF 峰度值異常一覽...	72
表5.10	陰離子空白樹脂(E00)與監測點位目標元素 XRF 峰度值異常一覽...	72

一、前言

人類之活動對自然生態環境造成或輕或重的衝擊。工業革命之後，科學與技術帶來了新的物質文明，提高了人類之生活水準，但隨之而來的廢棄物，亦污染了人類賴以生存的自然環境(劉黔蘭，1998)。台灣地區因事業之廢污水放流系統與農業之灌溉用水系統未完全分離，使得灌溉用水含污染物質，透過河川渠道遭受污染的農地達危害與預警管制系統等級區域約占全國農地 2.65%，約 1.5 萬公頃列入高汙染潛勢範圍。其中又以民國 102 年 12 月高雄楠梓日月光 K7 廠驚傳偷排廢水至後勁溪與民國 103 年 1 月彰化電鍍廠藉由預埋暗管將廢水排放至福馬圳最為大家所關注，部份灌溉用水引自受污染河川、埤池、或因事業單位廢水須借用灌溉渠道排放，使得農業灌溉用水含污染物質，或於渠道底泥累積污染物，導致部份農田及其生產農作物遭受污染。故政府自 70 年代以來即持續進行農地土壤重金屬含量狀況之調查監測工作，統計台灣地區土壤重金屬含量達第五級以上者約 1,000 餘筆(每筆面積為 1 公頃)。並於土壤及地下水污染整治法通過後，辦理 319 公頃污染農地清查與管制、復育工作。

河川水質是影響民眾健康的重要因素，也反映了國民生活品質的情況。故各國在水資源短缺及水質惡化的情況下，掌握河川水體的污染現況、污染來源種類、河川污染特性與改善措施，成為河川污染防治的重要工作(黃信慈，2008)。台灣早期以農業為主，灌溉排水設施只是單純提供農田灌溉與排水之用。由於經濟與都市之蓬勃發展，使得人口日趨集中、工業廢水與市鎮及家庭污水劇增，公共排水溝的興建速度趕不上新興都市人口之發展，導致都市工業廢水及生活污水沒有專屬的污水道可排放廢污水，加上農田灌溉設施大部分又屬明渠形式，故大量的廢污水均利用農田水利會現有灌溉水路或排水路作為排放之途徑，不但直接影響到灌溉用水之水質，且造成許多灌溉渠道長期遭受污染(張珮錡，2001)。改善水體品質，保護水生生態環境健康成為國家與城市環境治理的一個重點。

農地受污染的事實存在，但是污染源卻追查困難，重金屬在農地又具有累積性，污染行為常伴隨廢污水分佈在田間，呈現農地受多種重金屬污染的現況。許多已經復育完成之農地依然種出重金屬含量超過食米重金屬限量標準之稻米，須再進行補充調查，若污染潛勢存在，應檢討

整體復育的策略。台灣之農地污染大部分發生在水田，主要係因水田需要大量灌溉用水，若灌溉水質之管理不善將導致農田暴露污染風險之中，且呈現系統性之問題(張尊國，2012)。鑑於偷排廢水事件含有不定時、延時短、污染濃度高且地點廣泛等特性。在政府稽查資源有限的條件下，建立有效監測、成本低廉與分析快速的追蹤鎖定汙染源的方法實為當務之急。

二、研究目的

受重金屬污染農地係因長期累積多重污染源所致，污染行為人難以追查，使得污染狀態長期以來無法有效改善。在政府稽查資源有限的條件下，建立有效監測、成本低廉與分析快速的追蹤污染源的方法實為當務之急。本研究利用樹脂離子交換為基材做成重金屬監測包(稱之為「樹脂縮時記錄膠囊」)，大量將其投放於監測之區域，一段時間後收回監測包測定所吸附之重金屬，污染源的分布特性即被有效掌握，輔以環境指紋辨識方法之科學證據，污染行為人無所遁形。其優點是監測成本低廉、效率高與分析快速(桌上型 XRF)，加上「樹脂縮時記錄膠囊」紀錄污染源排放的敏感度(重金屬濃度)與位置(移動性低)遠高於底泥所反應的現況。針對夜間、假日或間歇性等偷排行為，「樹脂縮時記錄膠囊」之研究輔以地理資訊系統之空間相關性分析可以有效掌握追蹤特定污染行為人，達到以科學證據做為法律求償責任之認定。本研究希冀透過研發「樹脂縮時記錄膠囊」發展為環境指紋辨識方法之一，鎖定廢水違法排放之區域，進一步提供政府相關稽查單位明確目標，期能利用有限稽查資源為土壤環境品質監督做最大化的運用。

三、文獻探討

3.1 背景說明

台灣地區因事業之廢污水放流系統與農業之灌溉用水系統未完全分離，使得灌溉用水含污染物質，透過河川渠道遭受污染的農地達危害與預警管制系統等級區域約占全國農地 2.65%，約 1.5 萬公頃列入高汙染潛勢範圍。目前台灣仍是全球消費性電子產品的代工重鎮，舉凡 TFT-LCD、半導體、手機製造業...等，所衍生出來工業廢水的污染種類包羅萬象。水質問題是一個多種因素構成的多層次複雜系統，污水評價因子的參數存在著不穩定性、監測數據的隨機性等(王玉芬和胡筱敏，2006)。社會發生特定重大污染事件時，對周遭環境與居民身心健康的衝擊往往造成巨大損失，後續國家也需支付龐大資源進行環境復育與整治的工作。台灣地區因為降雨特性(對流降雨強度大、時間短)與水文環境特殊(地形變化大，河川流速快)，使得許多無良工廠在河川流量瞬間暴增同時偷排工業廢水以規避高昂的廢水處理成本或利用假日時期傾倒廢水至河川渠道逃避政府稽查(如表 3.1 所示)。

違法偷排廢水事件隨著時間的累積，對環境的殘害與影響正逐漸對生活在這片土地的居民產生傷害。環保署為強化監控全台廢水排放，投注大量人力物力，管制工業區、工廠業者加裝「廢水 24 小時自動監測與連線傳輸」，密切控管有無偷排廢水，2013 年展開第 1 階段，有 35 處大型工業區完成，目標 2014 年底共 55 家業者設置完畢，掌握全台工業區 90% 以上水量即時排放情況。然而對於身處在工業區外的廠商，只能透過稽查手段來喝止違法排放發生，而發生偷排事件的地點與廠家絕大多數都發生在非工業區的範圍。

統計本研究蒐集之事業廢氣汙水偷排事件計有 36 件(如表 3.2 所示)，涵蓋時間自民國 102 年 10 月至民國 104 年 5 月，北部地區有 15 件，集中在桃園；中部地區有 8 件，集中在彰化；南部地區有 13 件，集中在高雄。進一步分析發現汙染事件的原因大部分都是自然水體顏色產生變化而遭民眾舉發所致，主管機關多以勒令停工或開單告發等行政手段結案，比例達 72%；移送司法機關以刑法 190 條之 1 或水汙染防制法起訴只有 3 件，佔比 8%。分別是民國 102 年 12 月高雄日月光 K7 廠違法排放汙水至後勁溪；民國 103 年 1 月彰化福馬圳電鍍業違法排放汙水至灌溉渠道以及民國 104 年 1 月高雄強冠公司在勒令停工後仍違法排放汙水等案。

表 3.1 台灣與國外地區事業廢棄污水偷排事件一覽表

編號	汙染事件	發生時間	發生地點	處理結果
1	東山大排「牛奶溝」再現	2015.05.11	彰化員林	有關當局正在調查
2	高市環保局查獲工廠偷排有害廢水入後勁溪當場勒停	2015.04.26	高雄市楠梓區	勒令停工、依環保法規開單告發
3	彰濱工業區水車假抽真排廢黑藥水毒害文蛤	2015.04.19	彰化縣西彰濱工業區	依環保法規開單告發
4	桃園市違章廠排強酸廢水遭罰列優先拆除	2015.04.18	桃園市龜山區	依環保法規開單告發並被列為優先拆除廠房
5	台中市外埔區水圳遭倒廢機油染黑 5 公頃農田	2015.04.10	台中市外埔區	有關當局正在調查
6	嘉義東石鄉一資源回收場將未經處理廢水排入大排，造成溝水染紅大排水溝血流成河	2015.03.21	嘉義東石鄉	依環保法規開單告發等檢驗結果出爐後，將依法嚴懲
7	「加暘環保公司」違規桃園平鎮大排水溝水變紫色	2015.03.16	桃園平鎮	勒令停工、依環保法規開單告發
8	復興空廚利用黑夜、大雨掩護，將未經處理的高濃度事業廢水偷排入南崁溪	2015.03.06	桃園大園	勒令停工、依環保法規開單告發
9	華映排強酸水污染桃園灌溉渠	2015.03.03	桃園八德	依環保法規開單告發
10	屏東工業區內荒廢 20 多年的華全食品廠漏油污染河川	2015.02.17	屏東市	視後續處理態度，依環保法規開單告發
11	中壢屠宰場排廢水污染社子溪	2015.02.11	桃園市中壢	依環保法規開單告發
12	滲眉埤遭不肖業者污染，成為一灘黑色死水	2015.02.09	桃園市大園區與蘆竹區交界	查無實據環保署：檢調偵辦
13	新屋 4 家豆腐工廠，排放發酵酸性廢水，污染灌溉溝渠	2015.01.30	桃園市新屋	依環保法規開單告發
14	中科滯洪池變乳白色居民憂喝汙水管線阻塞	2015.01.29	台中市	查無實據到場，同步採樣送驗

表 3.1 台灣與國外地區事業廢棄污水偷排事件一覽表(續 1)

編號	汙染事件	發生時間	發生地點	處理結果
15	電鍍廠排汙泥彰化大埔截水溝滿魚屍設備異常	2015.01.29	彰化市	依環保法規開單告發
16	高雄強冠公司勒令停工仍排汙水	2015.01.28	高雄	依照違反《水污染防治法》將相關負責人起訴
17	營造廠商將未經處理的黃褐色工程廢水，直接排入道路側溝，染黃茄苳溪	2015.01.16	桃園市蘆竹	依環保法規開單告發
18	未經合法登記從事豆乾製造食品廠，涉嫌排放乳白色酸性廢水，污染魚池	2015.01.09	桃園市龍潭	依環保法規開單告發
19	害大坑溪變色桃園工廠挨罰	2015.01.09	桃園獲龜山	依環保法規開單告發
20	皮革工廠埋設暗管排放廢水，疑似硫酸的成份污染，讓魚群暴斃	2015.01.07	台中霧峰	依環保法規開單告發
21	山東抗生素大廠涉偷排有毒廢水	2014.12.26	中國山東省	仍在調查
22	天賜畜牧場偷排廢水將原廢水偷排至雨水道重罰停工	2014.12.01	高雄岡山區	勒令停工、依環保法規開單告發
23	新久益牧場以未經許可登記管線洩漏廢水	2014.12.01	高雄大樹區	依環保法規開單告發
24	螺絲工廠俊宇興業有限公司鳳凰颱風來襲將原廢水槽的廢水排放至廠外	2014.09.23	高雄燕巢	依環保法規開單告發
25	墨西哥北部省有來自礦場的有毒化學物外洩，流入當地河川	2014.09.22	墨西哥	成立信托基金，處理傷害賠償，進行清理
26	墨西哥哈利斯科州的阿蒂特蘭湖泊 53 噸魚暴斃懷疑附近的廢水處理廠所造成的污染	2014.09.03	墨西哥哈利斯科州	有關當局正在調查
27	埋伏 3 個月南市環局逮違法排廢廠(皮革工廠)	2014.08.22	台南善化	依環保法規開單告發
28	觀音工業區鎰聖科技公司非法將強酸廢液排入雨水下水道	2014.08.20	桃園	勒令停工、依環保法規開單告發

表 3.1 台灣與國外地區事業廢棄污水偷排事件一覽表(續 2)

編號	汙染事件	發生時間	發生地點	處理結果
29	雲林抬棺抗爭富喬工業表遺憾 (斗六市湖山里咬狗社區農民因種植的文旦、香蕉枯萎，造成農損。)	2014.08.20	雲林縣	查無實據
30	環檢警聯手出擊查獲 6 家違法畜牧業者	2014.08.20	台南市	依環保法規開單告發
31	台南安順大排又見趁颱風排廢 (偷排廢油)	2014.07.24	台南	查無實據
32	精密廠排強酸廢水桃縣開罰	2014.05.28	桃園龜山	依環保法規開單告發
33	雨中排廢水桃園染整廠遭停工	2014.05.21	桃園縣	勒令停工、依環保法規開單告發
34	蘆竹水溝假日排污環局抓不到元兇	2014.02.19	桃園蘆竹	查無實據
35	彰化福馬圳 6 家電鍍業違法排放廢污水	2014.01.15	彰化縣	勒令停工、依環保法規開單告發、以刑法 190 條之 1 排放毒物罪起訴相關負責人
36	偷排強酸廢水電鍍廠罰 60 萬停工	2014.01.08	高雄市	勒令停工、依環保法規開單告發
37	高雄楠梓日月光 K7 廠驚傳偷排廢水至後勁溪	2013.12.09	高雄市	勒令停工、依環保法規開單告發、以刑法 190 條之 1 排放毒物罪起訴相關負責人
38	鳳山溪皮革業埋暗管偷排廢水 環保局依水污法重罰停工	2013.11.27	高雄市	勒令停工、依環保法規開單告發
39	蘆竹諾瓦公司私接軟管偷排環 保局祭停工處分	2013.10.09	桃園縣	勒令停工、依環保法規開單告發

來源：本計畫整理

表 3.2 臺灣地區事業廢棄污水偷排事件統計表

區域	汙染事件 (件數)	疑似汙染源 (件數)	刑事起訴 (件數)
北部地區(桃園)	15	13	0
中部地區(台中、彰化雲林)	8	4	1
南部地區(嘉義、台南、高雄、屏東)	13	12	2

來源：本計畫整理

探究本計畫研究區域內自然水體所含各類金屬與非金屬濃度的文獻資料發現，陽離子以鈣的濃度值為最高，平均值約 74.30 mg L^{-1} ；鐵的濃度值次之，平均值約 32.87 mg L^{-1} (存在形式以陰離子錯合物為主)。陰離子則以碳酸氫根的濃度值為最高，平均值約 170.8 mg L^{-1} ；硫酸鹽的濃度值次之，平均值約 130.8 mg L^{-1} (簡傳彬，2011)。

表 3.3 彰化地區灌溉水質數據一覽表

水質項目 敘述統計	平均數	標準差	最小值	最大值
氯鹽(Cl^-) (mg/L)	7.6	13.11	N.D.	71.7
硫酸鹽(mg/L)	130.8	49.39	80	363
銅(Cu) (mg/L)	0.03	0.02	N.D.	0.09
鎘(Cd) (mg/L)	0.00	0.00	N.D.	0
鉛(Pb) (mg/L)	0.03	0.03	N.D.	0.125
鋅(Zn) (mg/L)	0.10	0.10	0.01	0.421
鎳(Ni) (mg/L)	0.03	0.03	N.D.	0.137
總鉻(T-Cr)	0.02	0.02	N.D.	0.089
鐵(Fe) (mg/L)	32.87	33.79	0.1	149
錳(Mn) (mg/L)	0.59	0.56	N.D.	2.39
鈣(Ca) (mg/L)	74.30	16.58	30.4	135
鎂(Mg) (mg/L)	26.68	8.71	15.4	50.5
鈉(Na) (mg/L)	14.03	11.81	3.7	74.9
碳酸氫根(mg/L)	170.8	30.71	100	292
碳酸根(mg/L)	0.1	0.82	N.D.	4.8

資料來源：簡傳彬(2011)

3.2 離子交換樹脂

吸附法是重金屬離子廢水處理應用中一種重要的物理化學方法，現今的研究重點主要集中在廉價、高效、易處理吸附劑的開發應用上(葉正華，1988)。離子交換法對於重金屬離子具有良好的交換特性，目前已被廣泛地用於去除廢水中的重金屬，其優點包括處理容量大，去除效率高與反應快速等(Ansari and Fahim, 2007; Donia et al., 2006)。其中，以鉻酸、硫酸銅及硫酸鎳等電鍍製程廢水的處理回收應用最為普遍(Juang and Wang, 2003; Kang et al., 2004; Eom et al., 2005; 李俊奎，2006)。離子交換樹脂吸附重金屬離子的效率會受到 pH、溫度、初始金屬濃度和接觸時間等因素的影響(Gode and Pehlivan, 2006)。然應用於污染源調查，因環境因子影響操作條件不易控制，目前國內、外尚無類似方法或設施。

所謂離子交換(Ion Exchange)，即為在一固、液間進行可逆的相互離子交換反應，樹脂顆粒可從液相中，將正電荷或負電荷的離子帶走，同時將等量的相同電荷離子釋出至水相中，此反應的發生並不會改變樹脂本身結構。樹脂包含一分子網狀結構(Molecular Network)，其上附著一離子基團(Functional Ion Group)，而樹脂上此固定離子基之電荷為一相反電荷之反離子 (Counter-ion)所平衡，以保持電中性。假若樹脂初始含有一反陽離子 A，當置入於含陽離子 B 的溶液中時，由於樹脂中之反陽離子 A 與在溶液中 A 之濃度差，和溶液中反陽離子 B 和與樹脂中 B 之濃度差，而產生一驅動力，使得陽離子 A 擴散進入溶液中，離子 B 進入樹脂中，此種離子 A 與離子 B 交換的反應，持續進行至平衡為止(如圖 3.1)。

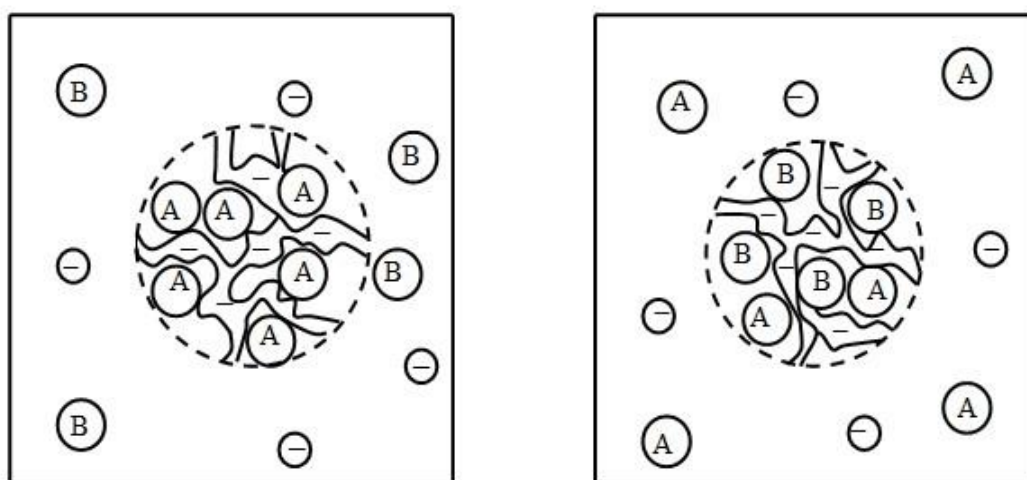


圖 3.1 離子交換樹脂交換反應平衡示意圖

將離子交換樹脂之離子 A 與 B 的交換反應，以簡單的化學計量式表示如下：



(1)式中 R-代表附著在樹脂上固定的陰離子作用基，根據質量作用定律 (Law of Mass Action)，離子交換樹脂對某一離子的選擇性(Selectivity)，可由下式表達：

$$K_A^B = \frac{[R-B^+][A^+]}{[B^+][R-A^+]} \dots\dots\dots(2)$$

(2)式中 $[R-A^+]$ $[R-B^+]$ 為樹脂相中離子 A^+ 、 B^+ 之濃度， $[A^+]$ 、 $[B^+]$ 為液相中離子 A^+ 、 B^+ 之濃度， K_A^B ：則為選擇係數(Selectivity Coefficient)，其表示當交換樹脂為 A 型時，置入一含 B 離子溶液中時，離子相對分佈的情形，亦即表示各離子對應於樹脂的相對親和力(Affinity)。但是，此值僅為一估計值，依選擇係數的大小，能定量地評估離子交換樹脂對各種離子的相對的親和力，進而可判斷其產生交換反應的先後次序。

人工合成離子交換樹脂一般是由一聚合矩體，通常為聚苯乙稀鏈 (Polystyrene chains) 藉二乙稀苯連結 (Divinylbenzene crosslinks) 而成的，和附著在聚合體鏈上之溶解性離子作用基組合而成，其作用基的總數和型式決定樹脂交換容量和離子選擇性(Liang et al., 2013; Manuel et al., 2008)。離子交換樹脂一般呈現多孔狀或顆粒狀，其大小約為 0.1~1mm，其離子交換能力依其交換能力特徵可分：

- (1) 強酸型陽離子交換樹脂：主要含有強酸性的反應基如磺酸基(—SO₃H)，此離子交換樹脂可以交換所有的陽離子。
- (2) 弱酸型陽離子交換樹脂：具有較弱的反應基如羧基(—COOH 基)，此離子交換樹脂僅可交換弱鹼中的陽離子如 Ca²⁺、Mg²⁺，對於強鹼中的離子如 Ca²⁺、K⁺等無法進行交換。
- (3) 強鹼型陰離子交換樹脂：主要是含有較強的反應基如具有四面體銨鹽官能基之一N⁺(CH₃)₃，在氫氧形式下，—N⁺(CH₃)₃OH⁻中的氫氧離子可以迅速釋出，以進行交換，強鹼型陰離子交換樹脂可以和所有的陰離子進行交換去除。

(4) 弱鹼型陰離子交換樹脂：具有較弱的反應基如氨基，僅能去除強酸中的陰離子如 SO_4^{2-} 、 Cl^- 或 NO_3^- ，對於 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 或 SiO_4^{2-} 則無法去除。

(5) 螯合樹脂：能引入樹脂的螯合基團有許多種，如乙二胺四乙酸 (EDTA)，它含有 $-\text{CH}_2\text{N}(\text{CH}_2\text{COOH})_2$ 之基團。這種螯合基團與分離離子間，既可形成離子鍵，又可形成配位鍵，構成穩定的環狀結構。其選擇性非常高，常用於處理一些貴重金屬，稀有金屬的提取與精製。

離子交換樹脂是以人工合成的聚合物，離子交換樹脂的結構如圖 3.2 與 3.3 所示，由惰性骨架(母體)，固定基團與活動離子三部份構成，由立體網狀結構的惰性骨架為母體，有規則的接上活性基團，也稱為功能基團(如 $-\text{SO}_3\text{H}$ 、 $-\text{COOH}$ 等)；樹脂本身由 S、Al、O、Ca... 等元素組成，粒徑約為 $500\ \mu\text{m}$ 。這種活性基團是由固定基團(如 $-\text{SO}_3^-$ 、 $-\text{COO}^-$ 等)與活動離子(即可進行交換的離子，如 H^+)組成。固定基團固定在惰性骨架上，不能自由運動，而其上的活動離子卻可再發生離子交換時，自由運動與溶液中的離子進行交換。合成樹脂時，加入一定量的交聯劑可使樹脂具有堅韌性、不溶性及一定的穩定性，但交聯劑的用量必須適當，交聯劑的用量越高，網狀結構越緊密，吸水性及溶脹性越小，但過高的交聯度，會使結構太過緊密，高分子量的離子因為立體障礙難於滲透進入樹脂中進行離子交換，所以反而降低交換反應速率。

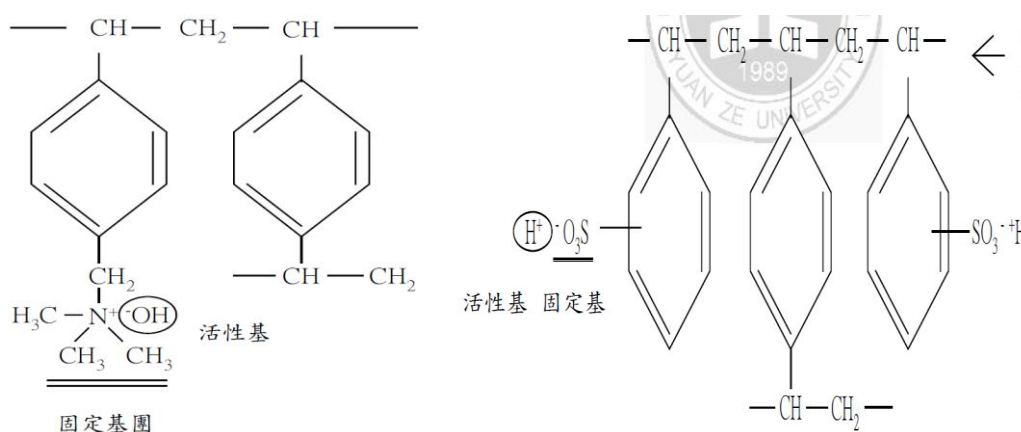
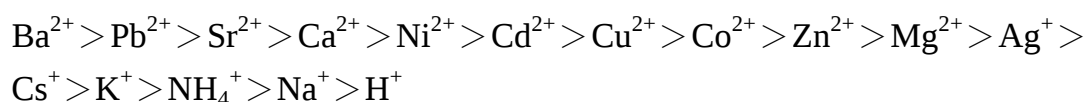


圖 3.2 陰離子交換樹脂圖 3.3 陽離子交換樹脂

不論是離子交換樹脂或是沸石，都有其一定的可交換基濃度，稱為離子交換容量(ion exchange capacity)。陽離子交換樹脂的交換容量大約在 $2.0\text{-}2.5\ \text{eq L}^{-1}$ ；陰離子交換樹脂的交換容量大約在 $1.2\text{-}1.3\ \text{eq L}^{-1}$ (Eom et al.,

2005)。因為陽離子交換為一化學反應，故必須遵守質量平衡定律。 K 值的大小代表離子的相對趨勢， K 值愈大，離子愈易被交換，因此離子交換樹脂傾向於交換下列離子(1)具有高電荷，(2)具有較小的水合體積的離子，(3)具較大極性之離子，(4)與交換基反應較強的離子，(5)不易與其他離子形成錯合物的離子。對具有強反應基的強酸性陽離子交換樹脂（如含磺酸基， $-\text{SO}_3\text{H}$ ）而言，交換趨勢可以由下列順序表示：



如果是弱反應基的弱酸性陽離子交換樹脂， H^+ 離子的位置是反應基的強度向左移動。對具有強反應基的強鹼性陰離子交換樹脂而言，交換趨勢可以由下列順序表示：



如果是弱反應基的弱鹼性陰離子交換樹脂， OH^- 離子的位置是反應基的強度向左移動。離子交換的方法常用於水或廢水的處理中，常見的實例如(1)硬水軟化處理：是環境工程上最常見的用途之一，將水中形成硬度的鈣、鎂等離子與離子交換樹脂上的鈉離子進行交換，以軟化水質；(2)除礦：利用離子交換法去除水中所有的陽離子及陰離子；(3)去除、回收廢水中的重金屬，例如電鍍工廠之廢水中所含有的鋅、銅、鎳等，都具有回收的價值。李俊奎(2006)認為離子交換技術之應用不論在理論上或技術上發展相當迅速，而其應用在技術及經濟上則必須考慮以下問題：

- (1) 離子交換劑的選擇包括容量、選擇性、價格、來源及其基本特性。
- (2) 在應用條件下需對操作過程、操作條件、操作間歇性及連續性過程之評估。
- (3) 操作過程相適應的裝置與設備之選擇與設計。
- (4) 再生劑的經濟與技術評估。
- (5) 環境問題。

四、研究方法與流程

4.1 研究架構

本研究為完成「樹脂縮時記錄膠囊」之研發設計，將其研究架構分為實驗室與現地試驗兩個方向。實驗室部份著重於「樹脂縮時記錄膠囊」之研發與形狀設計，在開放水體中達到吸附重金屬效率高(吸附實驗設計)與現地可適用性最佳化(取樣方便)之功能，其流程如圖 4.1 所示；現地試驗係利用樹脂離子交換為基材做成重金屬監測包(樹脂縮時記錄膠囊)，將其置於預監測之點，一段時間後收回監測包利用 X-射線螢光光譜儀(I-Trax)快速分析測定重金屬的元素含量分布特性，所吸附之重金屬可做為污染來源排放證據之一，其流程如圖 4.2 所示。在計畫執行中，針對農田試驗區選址的過程，因耕種農民對於「樹脂縮時記錄膠囊」的放置多有顧忌，擔心對日後水稻收穫產生影響而無法同意放置「樹脂縮時記錄膠囊」。改採針對河川灌溉渠道延長監測時間與增加投放個數的替代方案進行，其修正內容與細節於 4.5 節說明。

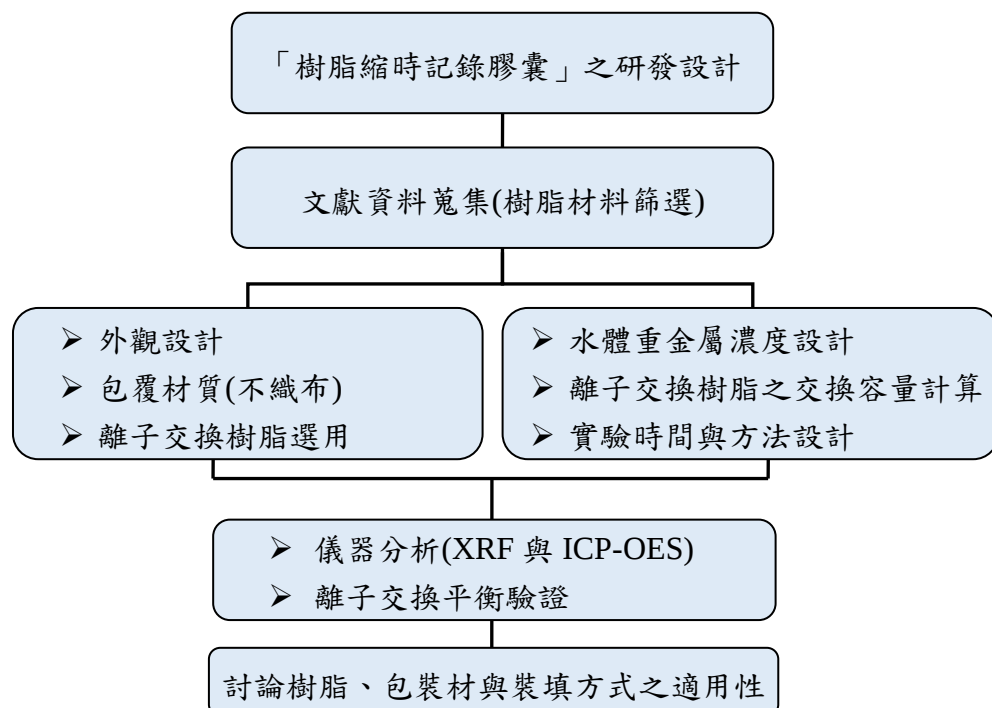


圖 4.1 實驗室試驗研究流程圖

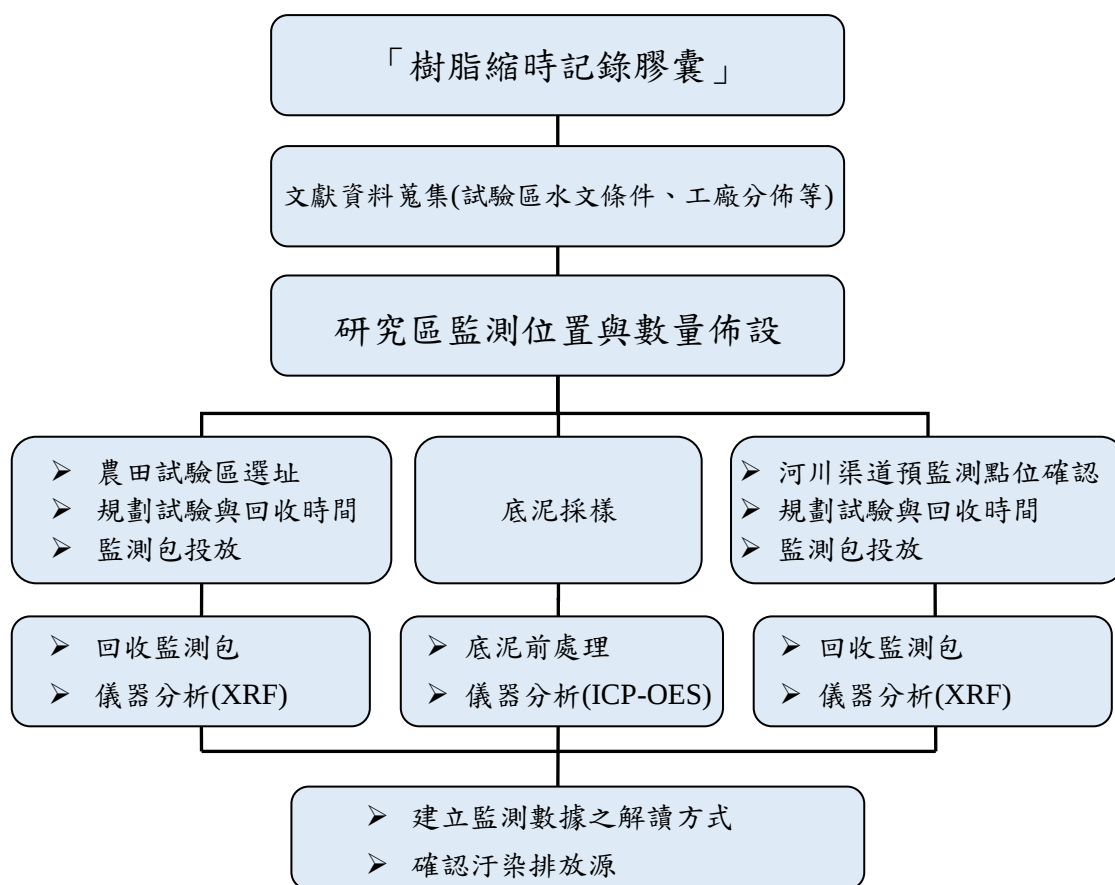


圖 4.2 現地試驗研究流程圖

4.2 研究區域

本研究除了進行實驗室交換樹脂的陽離子吸附實驗之外，規劃彰化縣東西二、三圳灌排系統做為現地實驗測試地點，其環境現況描述如下：

彰化水利會供水範圍包含南投縣西部及彰化縣(烏溪下游灌區及濁溪北岸)，灌區介於烏溪與濁水溪兩河流之間，東起平林溪、貓羅溪，西臨台灣海峽，南抵濁水溪與雲林縣毗鄰，北以烏溪與台中市為界，整個區域地形南寬北窄呈現等邊三角形，灌溉面積高達 4 萬餘公頃(如表 4.1)，渠道總長度約 1,800 公里。其中八堡圳、荖仔埤圳為最大灌溉系統，由集集攔河堰經北岸聯渠道取水灌溉(如表 4.2)。烏溪系統區僅祇提供全彰化灌溉量 17.6%，而且都集中在最北邊的彰化市，本計畫涵蓋之圳路呈東西走向，長度約有 13.5 公里長，早期的灌溉面積約有 1,600 公頃，後來隨著農業的不景氣，如今灌溉面積只剩 800 至 1,000 公頃。研究計畫區內東西二圳長度 18,000 公尺，東西三圳長度 12,000 公尺。

表 4.1 彰化農田水利會灌溉系統所屬圳路灌溉面積與用水量

水利會	水系	圳路	總計灌溉面積(公頃)	總用水量(萬噸)
彰化水利會	濁水溪	同源圳、八堡一圳、八堡二圳、荖仔埤圳、永基二圳、永基三圳、深耕二圳、深耕三圳、大義慶豐圳、義和圳、菁埔圳、泉成圳、挖子圳、頭汴圳	39,936	97,000
	烏溪	東西二圳、東西三圳、番子田圳、溪頭上埤、溪頭下埤、福馬圳	5,629	19,839
合計			45,565	116,839

資料來源：經濟部水利署中區水資源局 <http://www.wracb.gov.tw/ct.asp?xItem=897&ctNode=898&mp=6>

東西二、三圳位於台灣中部彰化縣內，水源自貓羅溪，渠道流經彰化市與和美鎮，灌區內各類工廠林立，其中電鍍業登記搭排者有 44 家，

廢水量為 1,740 噸/日(徐玉標等, 1993), 零星並有未登記電鍍廠密集分佈在支流或小給水路, 廢水間歇排出, 常使某些農田受害(朱海鵬等, 1992; 行政院環保署, 1990; Alloway, 1990)。因彰化市與和美鎮為中部地區主要金屬表面處理業與電鍍業聚集區域, 以往業者均以搭排形式將含重金屬污染物之廢水排入該流域中, 造成東西二圳沿線各水質監測站重金屬檢測結果常出現異常。

根據彰化農田水利會網頁資料, 東西二、三圳主要水源係於彰化市快官取自烏溪支流貓羅溪, 輔以 8 口深水井, 流域灌溉面積 1,095 公頃(如圖 4.3 所示), 均為兩期作物, 最高計畫流量為 6.095 CMS, 到水流公制水門的計畫流量為 2.445 CMS, 考量流域上游的重金屬污染因具有蓄積作用且影響範圍廣, 加以彰化縣環境保護局先前針對水流公制水門之水質監測顯示該處之水質長期超出灌溉用水水質標準。為掌握轄內各水域特別是灌溉渠道之污染情形, 彰化縣環境保護局自 91 年開始即針對東西二圳流域幾個代表性的監測點進行水質監測紀錄, 依據 97 年至 99 年間的水質監測資料顯示以銅(Cu)及鎳(Ni)污染物濃度超過灌溉用水水質標準之比率最高(謝心色, 2011)。行政院環境保護署每季於貓羅溪上游利民橋測站監測之重金屬, 資料顯示在利民橋測得的銅(Cu)濃度均低於 0.01mg/L, 鋅(Zn)均低於 0.03mg/L。



圖 4.3 彰化縣東西二、三圳灌排分布圖

表 4.2 彰化農田水利會灌溉系統與圳路

系統別	渠道(圳路)別	灌區別
烏溪	貓羅溪	上埤幹線
		下埤幹線
		番子田圳
	東西圳	東西二圳
		東西三圳
	福馬圳	六股圳
		四股圳
		新埤舊圳
濁水溪	同源圳	同源圳幹線
		炭寮幹線
		舊圳幹線
		第一支線
	八堡圳	八堡一圳
		八堡二圳
	荊仔埤圳	荊仔埤幹線
		永基二圳
		永基三圳
		深耕二圳
		深耕三圳
	舊濁水溪	舊濁水溪南岸
		舊濁水溪北岸
	頭汴埤	頭汴圳
		新圳

4.3 研究方法

早期離子交換的材料為天然或人工合成的沸石(Zeolites)，其為鋁鹽和矽酸鹽混合的礦物質。當此種材料以食鹽水將其轉化成鈉型時，能有效地應用在於水質軟化。然而，由於其交換容量低，同時此礦物質會溶解，使處理水中的矽含量增加，因此在 1930 年代後期，人工合成的樹脂被研究推廣後，直到今日大部分的離子交換樹脂都是採用聚合矩體(Polymer Matrix)的合成材料(李俊奎，2006)。人工合成離子交換樹脂是由一聚合矩體，通常為聚苯乙烯鏈(Polystyrene Chains)藉二乙烯苯連結(Divinylbenzene Crosslinks)而成的，和附著在聚合體鏈上之溶解性離子作用基組合而成。而在樹脂上作用基的總數和型式決定樹脂交換容量和離子選擇性。

本研究為順利完成「樹脂縮時記錄膠囊」之研發設計，將其研究方法分為實驗室與現地試驗兩個方向。實驗室部份著重於「樹脂縮時記錄膠囊」之研發與形狀設計，在開放水體中達到吸附重金屬效率高(吸附實驗設計)與現地可適用性最佳化(取樣方便)之功能，其流程如圖 4.1 所示；現地試驗係利用樹脂離子交換為基材做成重金屬監測包(「樹脂縮時記錄膠囊」)，將其置於預監測之點，一段時間後收回監測包利用 X-射線螢光光譜儀(I-Trax)快速分析測定重金屬的元素含量分布特性，所吸附之重金屬可做為污染廠家排放證據之一，其流程如圖 4.2 所示。

「樹脂縮時記錄膠囊」係直接監測河川水體在特定時間所含重金屬特性變化情形，考量重金屬空間分布特性做為汙染源的環境指紋辨識方法，其優點是監測成本低廉與分析快速(桌上型 XRF)，再者其紀錄汙染源排放的敏感度(重金屬濃度)與位置(移動性低)遠高於底泥所反應的現況。本研究在實驗室與現地亦同步進行樹脂吸附分析實驗，做為後續資料分析與檢視修正之參考依據。同時針對規劃研究場址進行底泥採樣，比較「樹脂縮時記錄膠囊」在河川水體吸附重金屬現況與底泥重金屬含量分布特性之差異。

為進一步說明「樹脂縮時記錄膠囊」應用於環境監測之概念，假設有一河川流域有 3 種工廠廢水類型(分為 A、B 與 C 類，其中 A 與 B 類違法排放超標之廢汙水；C 類之排廢合於環保法規規範)利用搭排排入河川渠道。將「樹脂縮時記錄膠囊」大量投置於預監測之河川渠道中，待經過一段時間後(試驗設計時間為 7 天)，回收膠囊並將樹脂風乾後，利用 X-

射線螢光光譜儀(I-Trax)快速分析交換樹脂的重金屬元素(鈣、鎂、鈉、鉀、鎳、鉻、鉛、鋅、銅與錳等)含量特性。只要廠家在監測期間違法排放廢汙水於河道中，相關污染特性(重金屬含量與種類)會紀錄在「樹脂縮時記錄膠囊」內。利用地理資訊系統進行空間相關性分析，即可比對出污染源頭所在位置與違法排廢廠家的類別(如圖 4.4 所示)。針對同一採樣點可能承受不同污染來源的排放匯集，本研究根據主成分統計分析方法辨識受污染地區(或監測包位置)承受不同污染來源的權重與趨勢提供科學性證據佐證。

綜合上述資料，本研究希冀透過研發「樹脂縮時記錄膠囊」做為環境指紋辨識方法之一，縮小高風險廢水違法排放之區域，進一步提供政府相關稽查單位明確目標，期能利用有限稽查資源為河川渠道環境品質監督做最大化的運用。

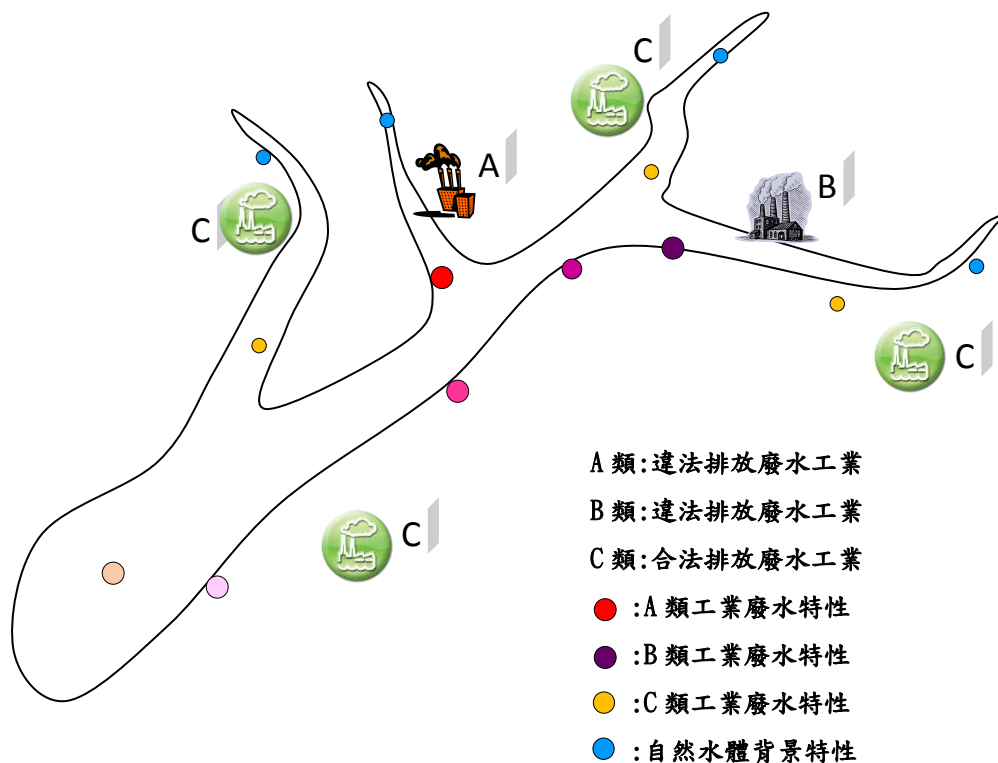
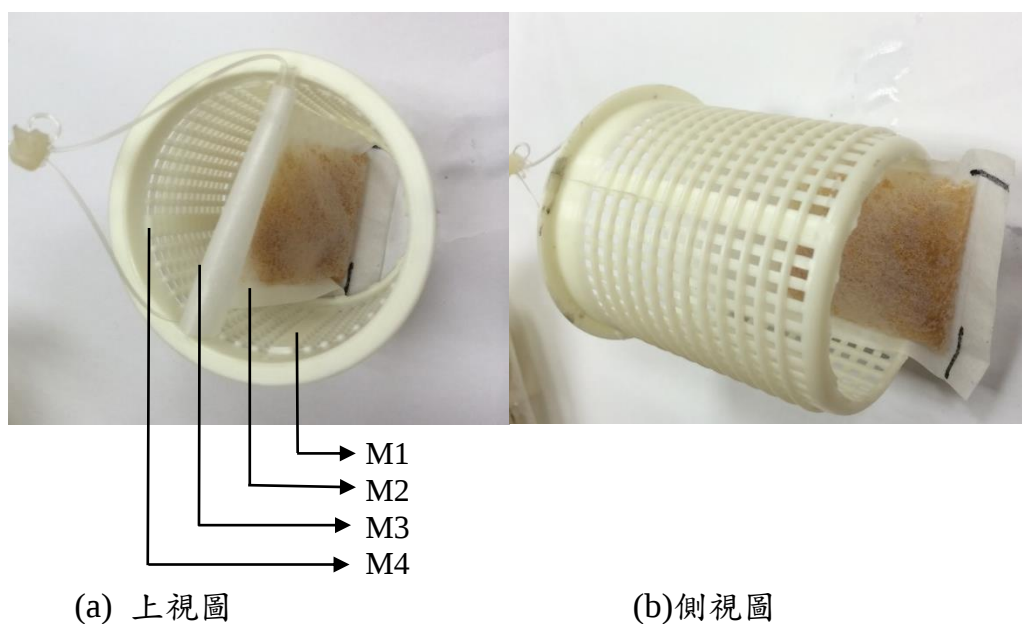


圖 4.4 「樹脂縮時記錄膠囊」投放於調查場址與污染源追蹤示意圖

4.4 「樹脂縮時記錄膠囊」研發

本研究計畫係以離子交換樹脂為基材研發出「樹脂縮時記錄膠囊」(如圖 4.5)，利用樹脂離子交換水中重金屬之快速及強大能力，將該膠囊放置於定點即可紀錄自投放至回收這段時間內排放(偷排)至環境水體中之重金屬。利用 X-射線螢光光譜儀(X-ray fluorescence, XRF) 或類似的儀器可快速檢測樹脂所含目標元素的濃度，檢視潛在污染源空間地理位置的相關性，作為環境中重金屬污染源分佈特性的科學證據，所有排污行為即被有效掌握。

「樹脂縮時記錄膠囊」的優點是監測成本低廉、效率高與分析快速，再者其紀錄污染源排放的敏感度(重金屬濃度)與位置(固定地點)遠高於對水樣與底泥採樣所能反應的現況，是針對提供夜間、假日或間歇性等偷排行為的科學證據的一大利器。





(c) 上視圖

(d) 下視圖

圖 4.5 「樹脂記錄膠囊」成品示意圖

「樹脂記錄膠囊」之製作方法與設計說明如下：

- (1) 「樹脂記錄膠囊」的填充基材為離子交換樹脂，該材料一般呈現多孔狀或顆粒狀，依其交換能力特徵可分為強(弱)酸型陽離子交換樹脂、強(弱)鹼型陰離子交換樹脂與螯合樹脂等五種。本計畫依其監測目標的重金屬污染源種類分別選定強酸鈉型陽離子交換樹脂與強鹼氯型陰離子交換樹脂作為「樹脂縮時記錄膠囊」的填充基材。
- (2) 填充交換樹脂的填充袋選用需有良好通透性(利於重金屬陽離子交換進行)、材質本身不能含有重金屬(避免干擾吸附結果)以及需要能夠耐浸泡、耐酸鹼之基本要求，本發明因此選用不織布或網狀聚酯纖維材質做為填充袋。
- (3) 避免「樹脂記錄膠囊」體積太大而影響渠道內水體的流動性，其內監測包的設計成類長方體雙包監測包樣式(如圖 4.6)。在雙包監測包中間預留一個圓孔作為固定監測包與外框底座之用。緊接著再將適量交換樹脂分別置入透水性良好之不織布或網狀聚酯纖維內，維持水分子能自由進出監測包不受阻隔。

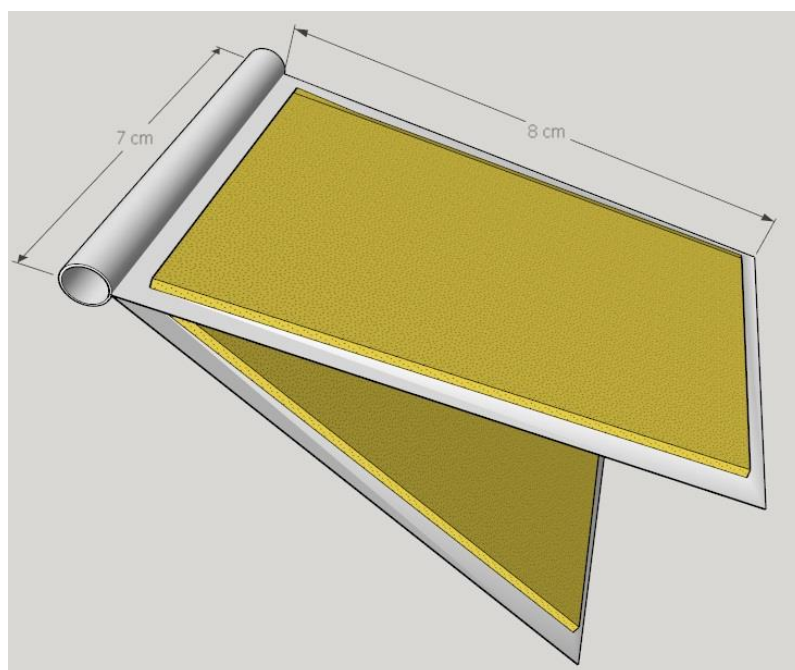
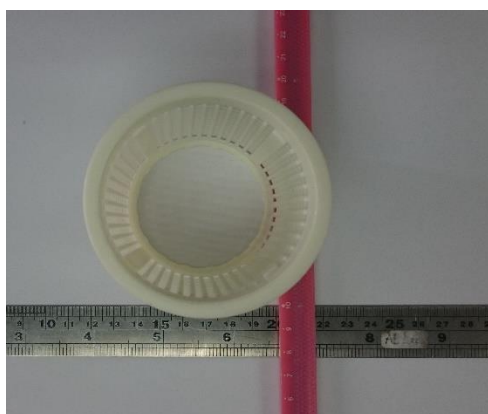


圖 4.6 「樹脂縮時記錄膠囊」類長方體雙包示意圖

- (4) 在上述的設計概念下，有外框底座係將監測包固定在塑料(PE、PVC 等)中空圓柱體(周圍孔隙大)的中間位置，圓柱體前後都鑄空減少水體通過的阻力(如圖 4.7)，增加監測包內水流的通量。



(a) 上視圖



(b) 側視圖

圖 4.7 「樹脂縮時記錄膠囊」外框底座示意圖

本計畫工作人員從 2 月開始製作「樹脂縮時記錄膠囊」，歷時約 25 個工作天，完成 460 個膠囊，製作程序包括包覆樹脂的膠囊製作(如圖 4.8 所示)、樹脂膠囊裝填離子交換樹脂(如圖 4.9 所示)以及透過釣魚線繫留與固定塑膠骨架等工作，其製作流程如圖 4.10 所示。



圖 4.8 樹脂膠囊製作



圖 4.9 樹脂膠囊裝填離子交換樹脂

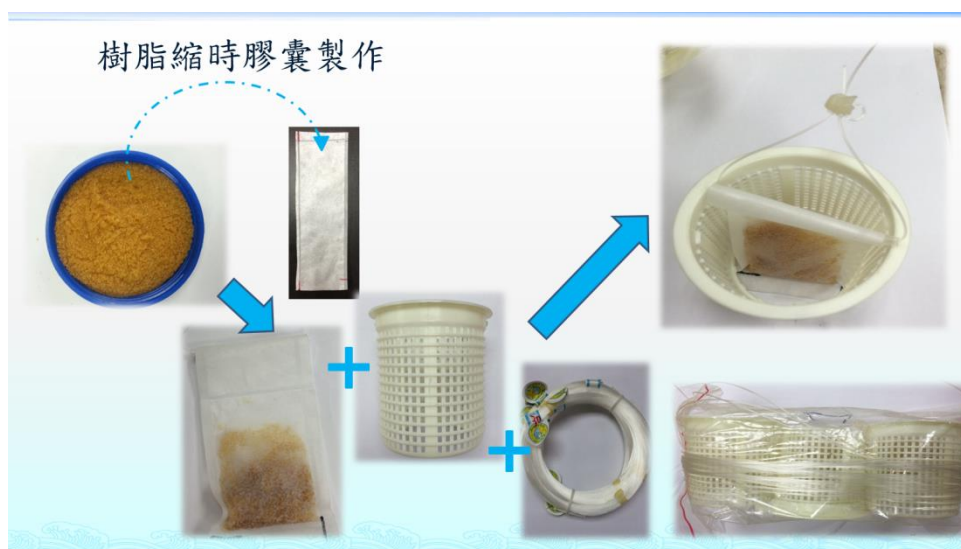


圖 4.10 「樹脂縮時記錄膠囊」製作流程示意圖

4.5 實驗室設計

陽離子交換樹脂利用氫離子(H^+)來交換水中的陽離子;而陰離子交換樹脂則利用氫氧根離子(OH^-)來交換陰離子,氫離子與氫氧根離子互相結合成中性水。利用鈉離子 Na^+ 代表所有的陽離子,而利用氯離子 Cl^- 代表所有的陰離子來進行離子交換反應,其反應示意圖分別如圖 4.11 與圖 4.12 下所示:

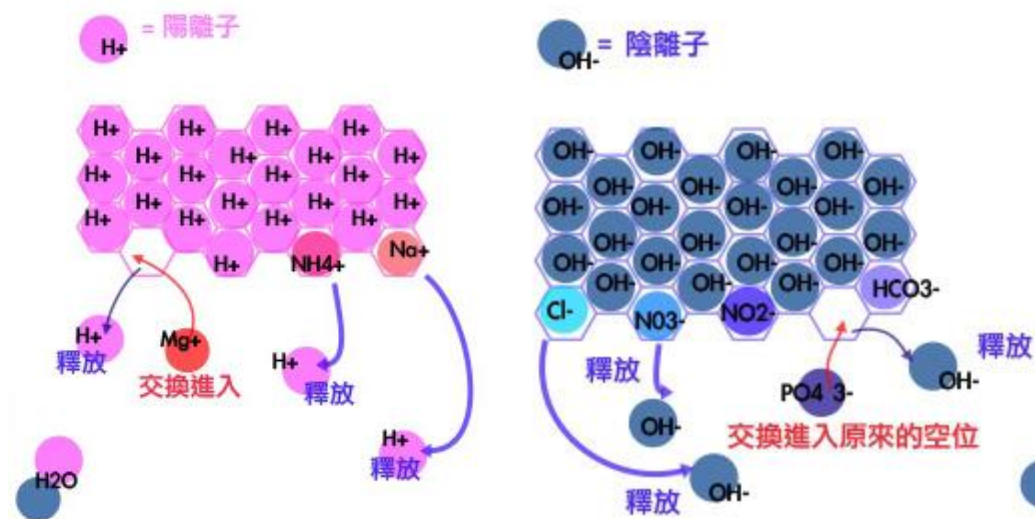


圖 4.11 陽離子交換樹脂反應示意圖 圖 4.12 陰離子交換樹脂反應示意圖

根據不同應用的需求,不同的陰/陽離子交換樹脂的化學官能基有強弱之分,導致其交換能力(純化能力)及再生條件皆有所不同。本研究選用陰離子與陽離子交換樹脂交互配製,其中鈉型陽離子交換樹脂對重金屬有高親和力,由 Purolite 公司製造,其主要分子結構為凝膠交聯聚苯乙烯(Gel polystyrene)符合 1% DVB,它是非常穩定的巨大網狀結構樹脂,官能基為磺酸,其基本物性與外觀分別如表 4.3 與圖 4.13 所示。現地實驗所使用陰離子交換樹脂為氯型陰離子交換樹脂,由 Dow 公司製造,主要分子結構為苯乙烯-二乙烯基苯,官能基為季銨陽離子,其基本性質與外觀分別如表 4.4 和圖 4.14 所示。

表 4.3 鈉型陽離子交換樹脂之基本性質

項目	內容說明
名稱	Purolite C100
應用	硬水軟化(Softening)、水體純化(Demineralization)
高分子結構	凝膠交聯聚苯乙烯(Gel polystyrene)
官能基	磺酸(Sulfonic acid)
離子交換形式	鈉型(Na^+)
陽離子交換容量	2.0 eq/L
含水率	44-48 %
顆粒粒徑範圍	300-1200 μm
顆粒密度	1.29 g/cm^3
顆粒耐受溫度	120 $^{\circ}\text{C}$
單價	60~120 元/公升

資料來源: <http://www.purolite.com/default.aspx?RelID=606273&ProductID=85>



圖 4.13 鈉型陽離子交換樹脂外觀

表 4.4 氯型陰離子交換樹脂之基本性質

項目	內容說明
名稱	MARATHON™ A Resin
應用	工業脫鹽(Industrial Demineralization)
高分子結構	苯乙烯-二乙烯基苯(Styrene-DVB)
官能基	季銨陽離子(Quaternary amine)
離子交換形式	氯型(Cl ⁻)
陰離子交換容量	1.3 eq/L
含水率	50-60 %
顆粒粒徑範圍	575 μm
顆粒密度	1.08 g/cm ³
顆粒耐受溫度	100 °C
單價	270 元/公升

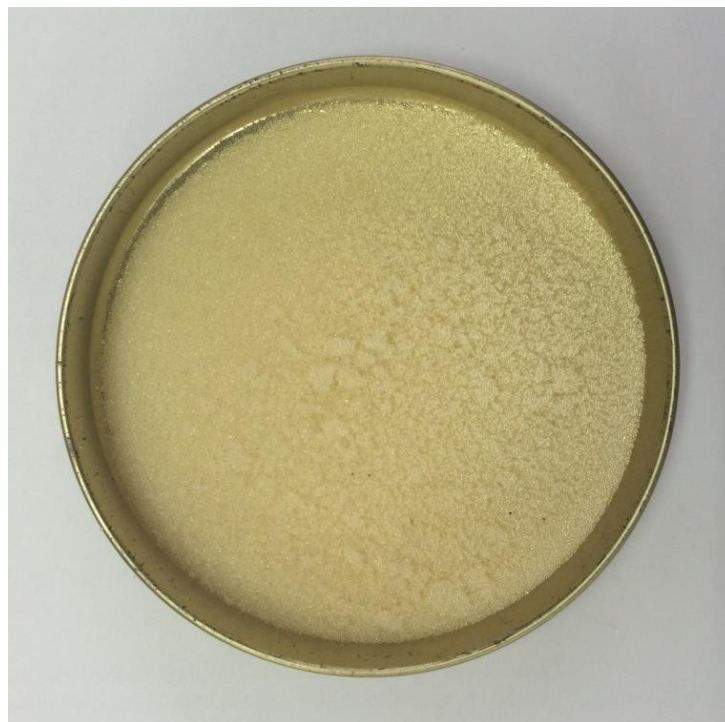


圖 4.14 氯型陰離子交換樹脂外觀

本研究實驗室試驗填充交換樹脂的裝置選用需有良好通透性(利於重金屬陽離子交換進行)以及材質本身不能含有重金屬(避免影響實驗結果)之要求，最後選用食用級之不織布材質做為填充袋。考量增加水體與交換

樹脂的接觸面積最大化、避免產生過多實驗廢液(以 1 公升為設計考量)以及實驗儀器空間的限制等因素。實驗室用「樹脂縮時記錄膠囊」之設計外觀尺寸為 9*7 cm，內含填充交換樹脂重量為 20 公克(如圖 4.15)。

為進一步瞭解樹脂吸附重金屬過程對於樹脂之外觀的影響，本研究對於實驗前後的樹脂利用掃描式電子探測顯微鏡(Scanning Electron Microscope, SEM)進行檢測，比較差異性。同時待現地試驗結束後，亦取出監測過後的樹脂進行掃描分析，做相關差異性比較與探討。



圖 4.15 實驗室用「樹脂縮時記錄膠囊」之初步設計外觀

本研究參考行政院環境保護署(2014)事業、污水下水道系統及建築物污水處理設施之放流水標準，針對鉻、鉛、鋅、銅與鎳等 6 種陽離子配製微量、低、中與高 4 種濃度，進行在初始重金屬濃度固定下之交換樹脂在開放水體中的吸附實驗，實驗時間設計為 2 小時。實驗步驟分述如下：

- (1) 實驗室用「樹脂縮時記錄膠囊」製作:取 20g 之陽離子及陰離子交換樹脂裝於不織布袋中，陽離子交換樹脂 16 個；陰離子交換樹脂 4 個，共 20 個。
- (2) 本實驗根據環保署公告之放流水標準，設計試劑濃度配製含重金

屬微量、低、中與高濃度等 4 種(體積為 1 公升)，其中鈣、錳與鈦 3 種元素不屬於環保署公告之放流水標準，重金屬濃度設計如表 4.5 所示。

- (3) 試驗分為二個部分，其一利用混凝攪拌實驗機攪拌水體，模擬河川渠道的流動現象(如圖 4.16 所示)；其二是將部分交換樹脂浸掛於水體中靜置(如圖 4.17 所示)。
- (4) 將配好之試劑於 1 公升容器中，利用 JAR-TEST 攪拌水體，產生流動現象，把裝有離子交換樹脂的袋子放入其中。
- (5) 試驗期間分別於不同時間及不同轉速(時間:0.5 分鐘、1 分鐘、3 分鐘、5 分鐘、10 分鐘、20 分鐘、30 分鐘、1 小時、2 小時;轉速:50 rpm、100 rpm、150 rpm、200 rpm)下抽取適量水體體積後(5 mL)，檢測金屬濃度並同時檢測 pH 值，總共 144 個樣品要測其金屬濃度與離子交換樹脂所交換出水中 Na 濃度，試驗時間 2 小時結束，抽取時間如表 4.6 所示。
- (6) 試驗期間所抽取水體利用 ICP 分析元素濃度，包含鈉、鋅、銅、鉻、鉛、鎳、鈣、錳與鈦等 9 種陽離子濃度。
- (7) 試驗結束後，將離子交換樹脂包取出，曬乾後利用 X-射線螢光光譜儀(I-Trax)分析樹脂之重金屬含量。分析元素包含鋅、銅、鉻、鉛、鎳、鈣、錳與鈦等 8 種元素。
- (8) 實驗完成，並進行數據討論。



圖 4.16 混凝攪拌實驗機攪拌水體模擬渠道水流示意圖

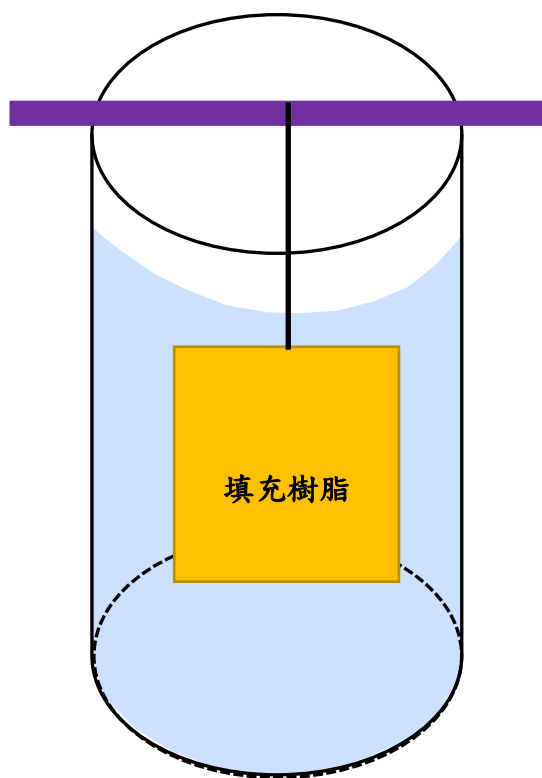


圖 4.17 樹脂吸附實驗靜置示意圖

表 4.5 重金屬配製濃度一覽表

元素 濃度	鋅	銅	鉻	鉛	鎳	鈣 [#]	錳 [#]	鈦 [#]	備註
	---mg/L---								
D1(微量)	0.5	0.3	0.2	0.1	0.1	2	0.2	0.1	環保署放流水標準*0.1
D2(低)	5.0	3.0	2.0	1.0	1.0	20	2.0	1	環保署放流水標準*1
D3(中)	50	30	20	10	10	100	20	5	環保署放流水標準*10
D4(高)	100	60	40	20	20	200	40	10	環保署放流水標準*20

[#]:非環保署放流水標準

表 4.6 實驗室水體取樣時間一覽表

	取樣時間(分鐘)									
編號	0	0.5	1	3	5	10	20	30	60	120
VC01	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
VC02	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
VC03	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
VC04	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

VC：表示流動水體

*：表示取樣時間點

4.6 實驗室分析方法

X-射線螢光光譜儀之檢測原理是利用放射源照射樣品後所放射出之螢光，經過偵測器的監視窗，並轉換成電子訊號傳輸至偵測器，再經由多頻道分析器（MCA）所收集到之各元素脈衝振幅，以分析及定量樣品中元素濃度初估值。本研究使用台灣大學貴儀中心的 X-射線螢光光譜儀 (I-Trax)，該儀器是由 BOSCORF(British Ocean Sediment Core Research Facility)製造，如圖 4.18 所示。



資料來源:<http://www.boscorf.org/instruments/itrax-high-resolution-xrf-analysis-sediment-cores>

圖 4.18 X-射線螢光光譜儀(I-Trax)

每一個原子都有自己固定數量的電子（負電微粒）運行在核子周圍的軌道上。而且其電子的數量等同於核子中的質子（正電微粒）數量。從元素周期表中的原子數我們則可以得知質子的數目。每一個原子數都對應固定的元素名稱，例如鐵，元素名是 Fe，原子數是 26。能量色散 X 螢光與波長色散 X 螢光光譜分析技術特別研究與應用了最內層三個電子軌道，即 K、L、M 軌道上的活動情況，其中 K 軌道最為接近核子，每個電子軌道則對應某元素一個個特定的能量層（如圖 4.19）。

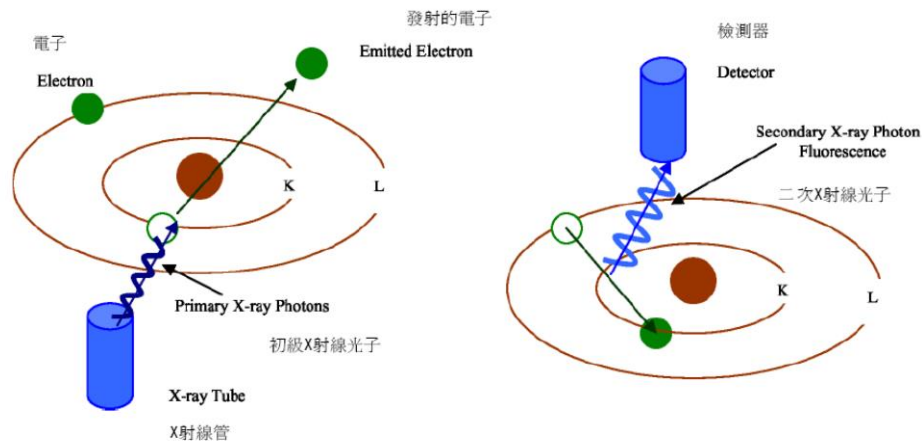


圖 4.19 X-射線螢光光譜儀測定原理

X-射線螢光光譜儀之檢測流程如下所述:

- (1) 分析前儀器需暖機 60 分鐘。
- (2) 樣本經風乾的前處理後，均勻化交換樹脂樣本，置於儀器專用塑膠盒內($1 \times 1 \times 0.5 \text{ cm}^3$ ，如圖 4.20 所示)，並等待分析。
- (3) 受檢之樣品表面應該盡量平坦，以便探針端的視窗有較佳表面接觸，得到較好的重複分析和代表性。
- (4) 儀器設定每偵測點位接收時間為 100 秒，每個點位間隔距離為 1mm，進行樣本重金屬濃度檢測分析。

圖 4.20 I-Trax 樣本專用塑膠盒($1 \times 1 \times 0.5 \text{ cm}^3$)

本研究擬於 X-射線螢光光譜儀分析時同步分析兩種空白樣品：儀器空白和方法空白，儀器空白是用來確認光譜儀或探針的端視窗是否有被污染，方法空白是用來監測實驗室是否受污染或干擾。

使用校正確認查核樣品來檢查儀器的準確性和評估待測物分析時的穩定性和一致性，這個校正確認查核樣品應該在每個工作天開始分析前、

真實樣品分析期間和每個工作天分析完成時皆需執行校正確認查核樣品分析。以 NIST 或其他 SRM 來執行校正確認查核時，可接受範圍為測量值在真值的相對誤差值 (RPD) 應在 $\pm 20\%$ ，假如測量值是落在這個範圍外，則查核樣品應重新分析。若測量值連續落在可接受範圍外，則儀器應該被重新校正。以低、中或高濃度待測物樣品之分析來測定方法之精密度，其檢測頻率最少每天應檢測一個精密度樣品，每個精密度樣品應該被重複分析 7 次。精密度檢測時應選用各種不同濃度範圍之樣品，以便評估濃度對方法精密度之影響，精密度樣品檢測時之儀器分析時間應與現場分析時間相同。同一批次或 20 個樣品做一次重複分析，若同時有不同基質的樣品時，每種基質的樣品均需進行重複分析，相對差異百分比應小於 20 %。

本研究分析實驗室水體與底泥(需經消化程序)的重金屬濃度利用感應耦合電漿-原子放射光譜 (Inductively Coupled Plasma with Atomic Emission Spectroscopy, ICP-AES，型號 Thermo scientific iCAP 7000 series) 將液體樣品經由霧化器霧化後，送入以高頻磁場感應所產生之高溫電漿，將霧化的待分析元素激發。由於被激發的元素由激發態回到基態時放出的光譜可由固態偵測儀分析，得到溶液中微量元素的定量分析。本研究試驗所需使用分析儀器與實驗藥品，分別如下表 4.7 與表 4.8 所示。

表 4.7 實驗分析儀器

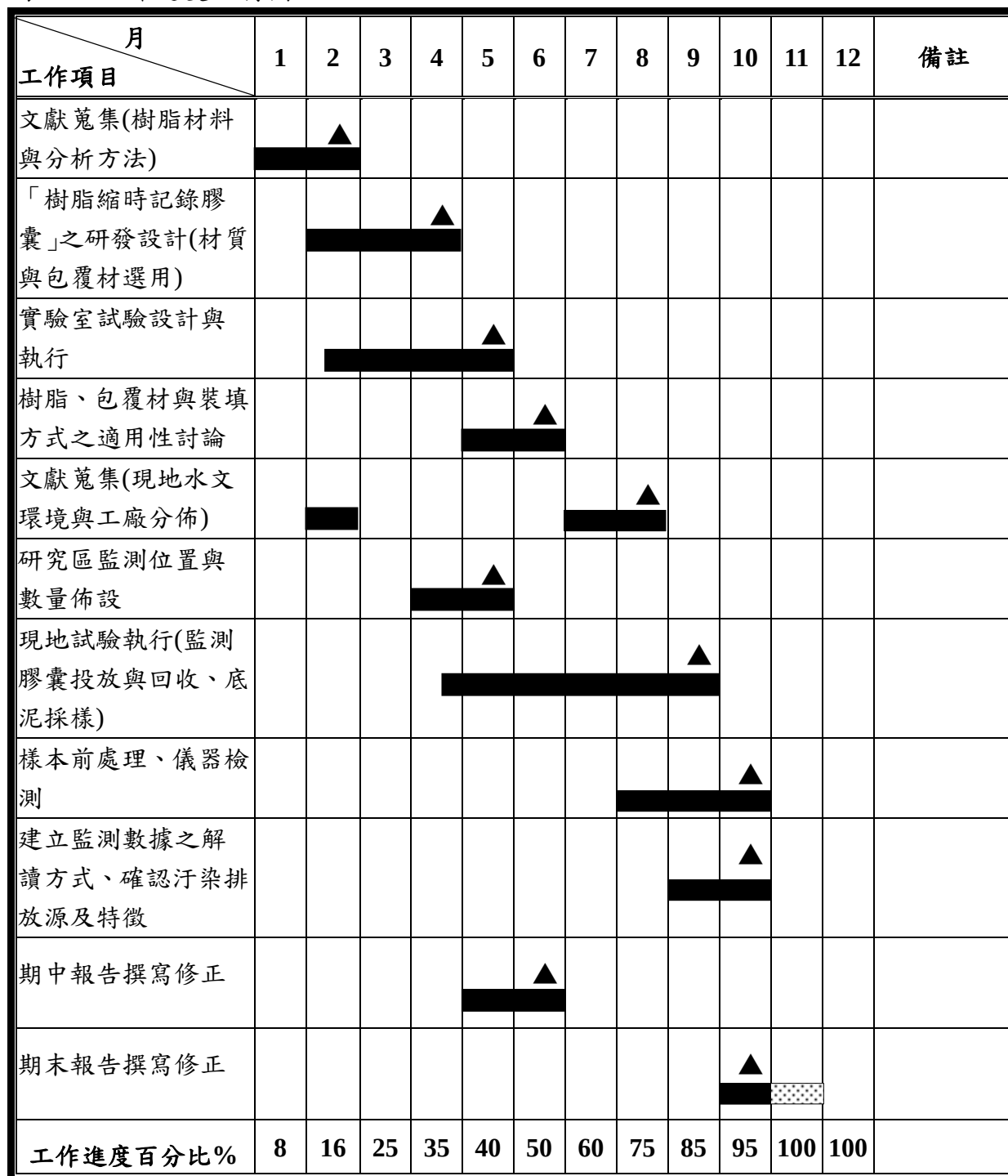
實驗裝置	型號或廠牌
酸鹼度測定儀	pH vision 6071, JENCO
密閉式微波消化器	MARS X (HP-500 plus), CEM
原子吸收光譜儀	Atomic Absorption Spectrometry Z-2300, Hitachi
感應耦合電漿-原子放射光譜	Thermo scientific iCAP 7000 series
X-射線螢光光譜儀	Itrax 岩芯掃描儀
掃描式電子探測顯微鏡(Scanning Electron Microscope, SEM)	JEOL JEM-1400 穿透式電子顯微鏡

表 4.8 實驗藥品一覽表

藥品名稱	化學式	廠牌等級
濃鹽酸(Hydrochloric acid)	HCl	林純藥工業試藥級
濃硝酸(Nitric)	HNO ₃	SIGMA 分析級
鋅標準溶液(Zinc standard solution)	Zn	SIGMA 分析級
鉛標準溶液(Lead standard solution)	Pb	SIGMA 分析級
銅標準溶液(Copper standard solution)	Cu	SIGMA 分析級
鉻標準溶液(Chromium standard solution)	Cr	SIGMA 分析級
鎳標準溶液(Nickel standard solution)	Ni	SIGMA 分析級
鈣標準溶液(Calcium standard solution)	Ca	SIGMA 分析級
鈉標準溶液(Sodium standard solution)	Na	SIGMA 分析級

4.7 工作進度甘特圖

表 4.9 工作進度甘特圖



預定查核點	期末 報告	1.完成樹脂材料、分析方法、研究區域環境資料之文獻蒐集 2.完成現地試驗執行(監測膠囊投放與回收、底泥採樣) 3.完成建立監測數據之解讀方式、確認汙染排放源及特徵 4.104 年 10 月提交已完成之期末書面報告乙式 10 份
說明： 1、「工作進度百分比」欄係為配合管考作業所需，累積百分比請視工作性質就以下因素擇一估計訂定：(1) 工作天數，(2) 經費之分配，(3) 工作量之比重，(4) 達成目標具體數字。 2、「預定查核點」，請在條形圖上標明※符號，在「預定查核點」欄具體註明關鍵性工作要項；▲表示已完成之工作項目。		

五、結果與討論

5.1 樹脂吸附實驗

本研究將實驗室試驗分為二個部分，其一利用混凝攪拌實驗機攪拌水體，模擬河川渠道的流動現象；其二是將部分交換樹脂浸掛於水體中靜置。根據所得分析數據發現靜置的交換樹脂針對水體內的重金屬吸附效率極低，建議後續將「樹脂縮時記錄膠囊」投放至監測區域渠道時，選擇點位應以渠道內水有流動現象為優先考量。實驗室試驗將著重在模擬野外渠道相似的環境條件(轉速的影響)，不在討論交換樹脂浸掛於水體中靜置的情況。根據已完成之吸附實驗的數據得知，交換樹脂在開放水體中針對不同重金屬、不同轉速與不同濃度對其吸附效率的反應也不同。茲就金屬類別依序列舉實驗結果與差異討論如下：

鋅(圖 5.1(a)-(d))

- (1) 針對同一濃度，轉速越高陽離子交換樹脂的吸附效率越好。
- (2) 除低轉速與高濃度值外，約 20 分鐘陽離子交換樹脂的吸附效率可達 40%以上。
- (3) 在高濃度條件下，雖然陽離子交換樹脂吸附效率不高，但是其吸附鋅的總量並無減少。
- (4) 在相同轉速條件下，鋅濃度值的高低對吸附效率的影響並無顯著差異，肇因於陽離子交換樹脂並無達到飽和。

鉛(圖 5.2(a)-(d))

- (1) 針對同一濃度，轉速越高陽離子交換樹脂的吸附效率越好。
- (2) 除低轉速外，約 20 分鐘陽離子交換樹脂的吸附效率可達 40%以上。
- (3) 在高濃度條件下，陽離子交換樹脂吸附效率與其他濃度並無顯著差異。
- (4) 在相同轉速條件下，鉛濃度值的高低對吸附效率的影響並無顯著差異，肇因於陽離子交換樹脂並無達到飽和。

銅(圖 5.3(a)-(d))

- (1) 針對同一濃度，轉速越高陽離子交換樹脂的吸附效率越好。
- (2) 除低轉速與高濃度值外，需達 30 分鐘陽離子交換樹脂的吸附效率達 40%以上。
- (3) 在高濃度條件下，雖然陽離子交換樹脂吸附效率不高，但是其吸附銅的總量並無減少。
- (4) 在相同轉速條件下，鋅濃度值的高低對吸附效率的影響並無顯著差異，肇因於陽離子交換樹脂並無達到飽和。

鉻(圖 5.4(a)-(d))

- (1) 針對同一濃度，轉速越高陽離子交換樹脂的吸附效率越好。
- (2) 除低轉速外，需達 20 分鐘陽離子交換樹脂的吸附效率達 30%以上。
- (3) 在高濃度條件下，陽離子交換樹脂吸附效率與其他濃度並無顯著差異。
- (4) 在相同轉速條件下，鋅濃度值的高低對吸附效率的影響並無顯著差異，肇因於陽離子交換樹脂並無達到飽和。

鎳(圖 5.5(a)-(d))

- (1) 針對同一濃度，轉速越高陽離子交換樹脂的吸附效率越好。
- (2) 除低轉速外，約需 30 分鐘陽離子交換樹脂的吸附效率達 40%以上。
- (3) 在高濃度條件下，雖然陽離子交換樹脂吸附效率不高，但是其吸附鎳的總量並無減少。
- (4) 在相同轉速條件下，鋅濃度值的高低對吸附效率的影響並無顯著差異，肇因於陽離子交換樹脂並無達到飽和。

鈣(圖 5.6(a)-(d))

- (1) 針對同一濃度，轉速越高陽離子交換樹脂的吸附效率越好。
- (2) 除低轉速外，約需 20 分鐘陽離子交換樹脂的吸附效率達 30%以上。
- (3) 在高濃度條件下，雖然陽離子交換樹脂吸附效率不高，但是其吸附鈣的總量並無減少。
- (4) 在相同轉速條件下，鋅濃度值的高低對吸附效率的影響並無顯著差異，肇因於陽離子交換樹脂並無達到飽和。

錳(圖 5.7(a)-(d))

- (1) 針對同一濃度，轉速越高陽離子交換樹脂的吸附效率越好。
- (2) 除低轉速外，約需 **30 分鐘**陽離子交換樹脂的吸附效率達 **40%** 以上。
- (3) 在高濃度條件下，雖然陽離子交換樹脂吸附效率不高，但是其吸附鈣的**總量**並無減少。
- (4) 在相同轉速條件下，鋅濃度值的高低對吸附效率的影響並無顯著差異，肇因於陽離子交換樹脂並無達到飽和。

鈦(圖 5.8(a)-(d))

- (1) 針對同一濃度，轉速越高陽離子交換樹脂的吸附效率越好。
- (2) 除低轉速與高濃度外，約需 **30 分鐘**陽離子交換樹脂的吸附效率達 **40%** 以上。
- (3) 在高濃度條件下，陽離子交換樹脂吸附效率遠較其他濃度來得低，不超過 **20%**。
- (4) 在相同轉速條件下，鋅濃度值的高低對吸附效率的影響並無顯著差異，肇因於陽離子交換樹脂並無達到飽和。

根據上述資料得知離子交換樹脂吸附重金屬實驗中，除低轉速外，吸附效率達 40% 以上的重金屬種類包括有鉛、錳(僅需 20 分鐘) 與鎳(需 30 分鐘); 吸附效率達 30% 以上的重金屬種類包括有鉻與鈣(需 20 分鐘)。除低轉速與高濃度外，吸附效率達 40% 以上的重金屬種類有鋅(僅需 20 分鐘)、銅與鈦(需 30 分鐘)。試驗結果發現該樹脂的吸附率隨著時間的累積而增加，此一結果說明，即便在開放水體環境中，只要含重金屬的水溶液與離子交換樹脂有短暫地接觸，就會發生離子交換樹脂吸附重金屬的現象。

除此之外，在比較相同轉速條件下，重金屬濃度的高低對吸附效率的影響並無顯著差異，係因陽離子交換樹脂在吸附過程中並無達到飽和，不會產生彼此競合的效果。在高濃度條件下，雖然陽離子交換樹脂吸附效率不高，但是其吸附重金屬的總量並無減少，表示樹脂內重金屬單位濃度值持續增加。

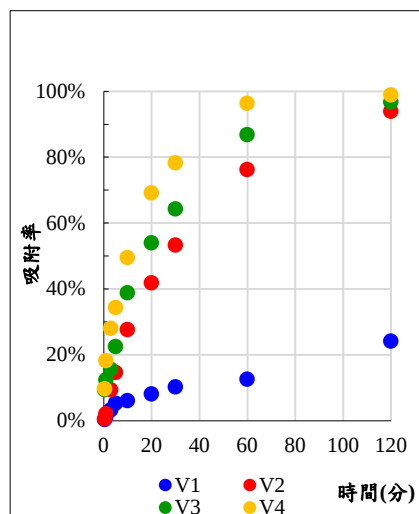


圖 5.1(a1) 陽離子交換樹脂對鋅的吸附率(微量)

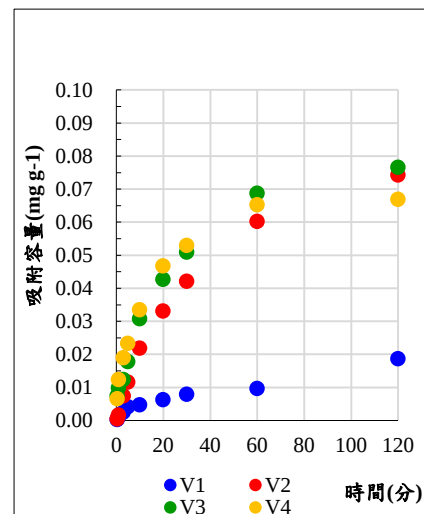


圖 5.1(a2) 陽離子交換樹脂對鋅的吸附容量(微量)

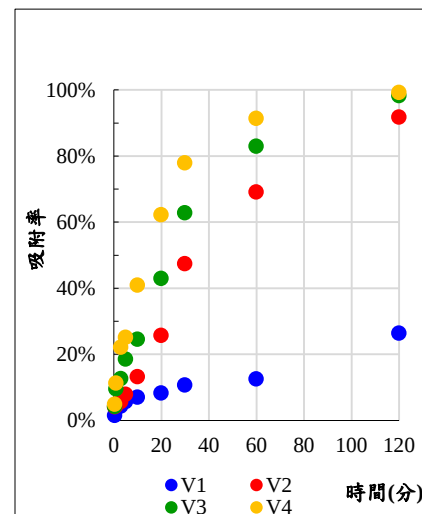


圖 5.1(b1) 陽離子交換樹脂對鋅的吸附率(低濃度)

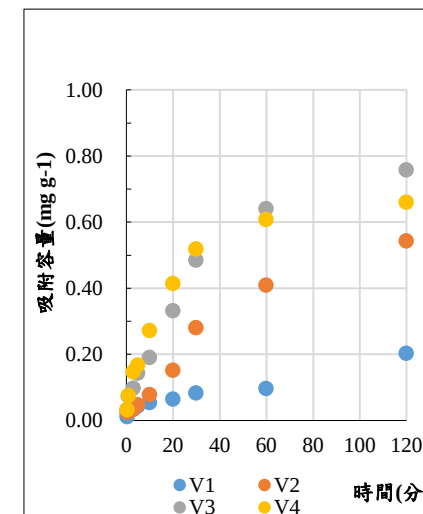


圖 5.1(b2) 陽離子交換樹脂對鋅的吸附容量(低濃度)

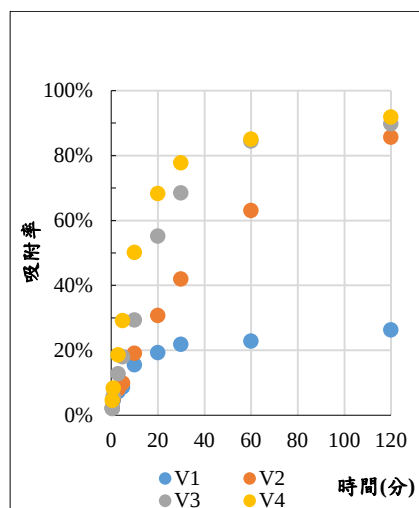


圖 5.1(c1) 陽離子交換樹脂對鋅的吸附率(中濃度)

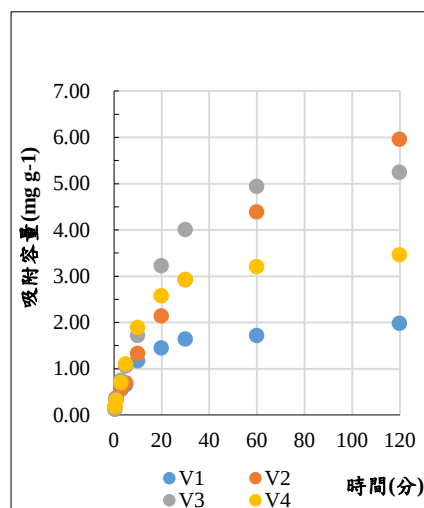


圖 5.1(c2) 陽離子交換樹脂對鋅的吸附容量(中濃度)

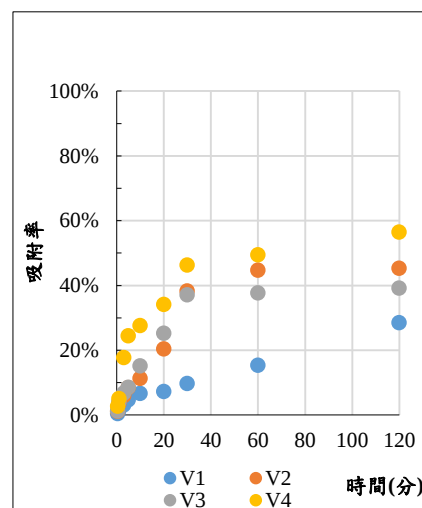


圖 5.1(d1) 陽離子交換樹脂對鋅的吸附率(高濃度)

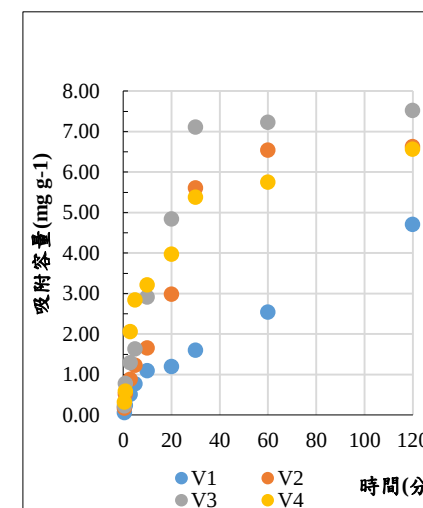


圖 5.1(d2) 陽離子交換樹脂對鋅的吸附容量(高濃度)

重金屬監測離子交換樹脂縮時膠囊之設計研發

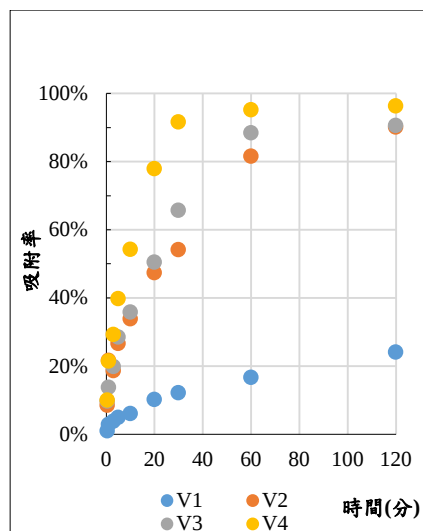


圖 5.2(a1) 陽離子交換樹脂對鉛的吸附率(微量)

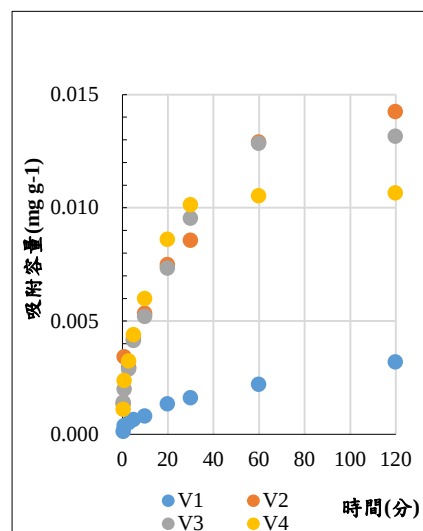


圖 5.2(a2) 陽離子交換樹脂對鉛的吸附容量(微量)

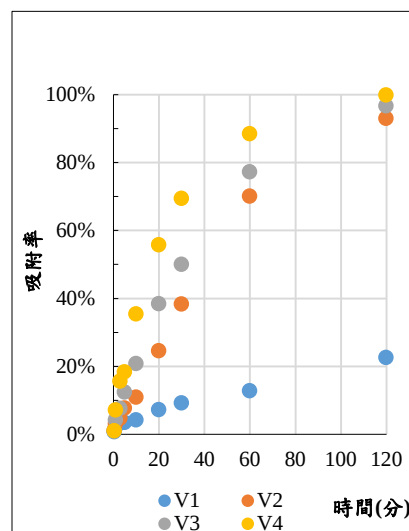


圖 5.2(b1) 陽離子交換樹脂對鉛的吸附率(低濃度)

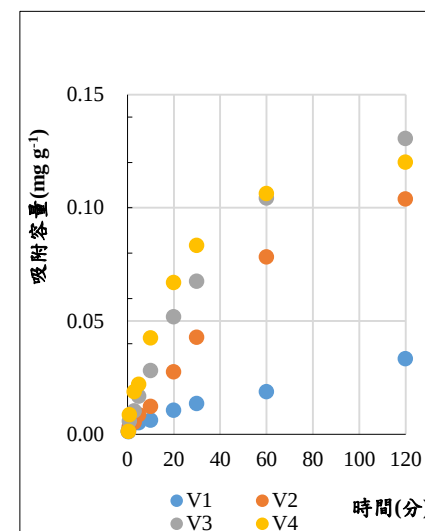


圖 5.2(b2) 陽離子交換樹脂對鉛的吸附容量(低濃度)

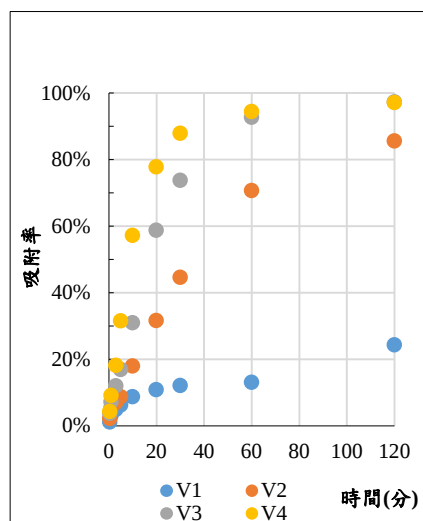


圖 5.2(c1) 陽離子交換樹脂對鉛的吸附率(中濃度)

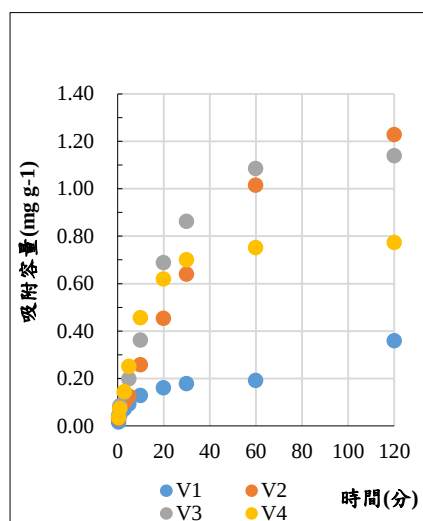


圖 5.2(c2) 陽離子交換樹脂對鉛的吸附容量(中濃度)

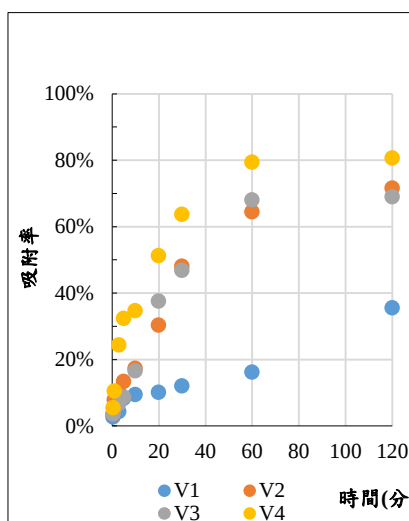


圖 5.2(d1) 陽離子交換樹脂對鉛的吸附率(高濃度)

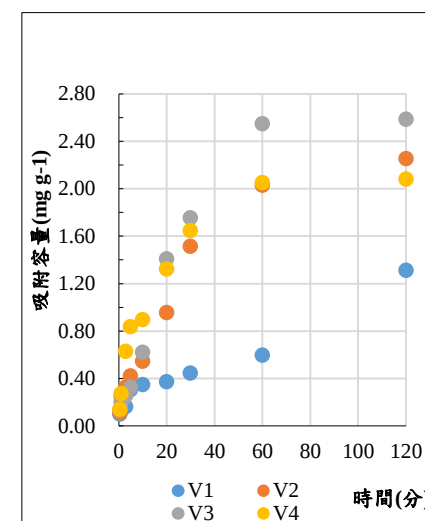


圖 5.2(d2) 陽離子交換樹脂對鉛的吸附容量(高濃度)

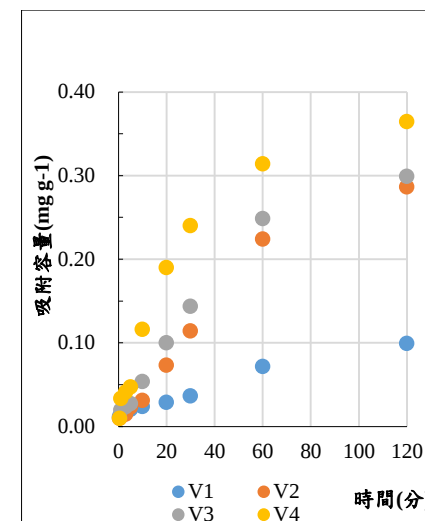
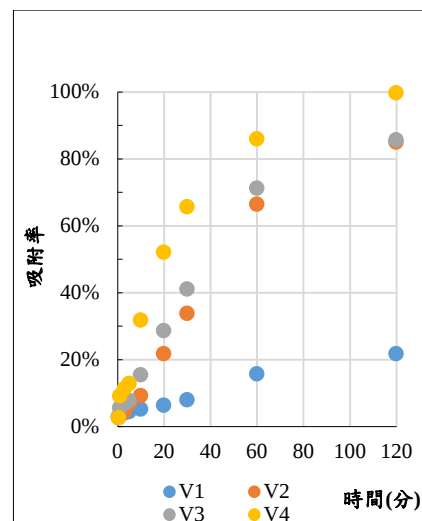
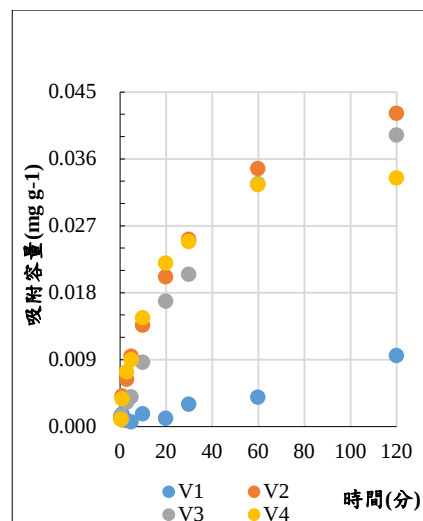
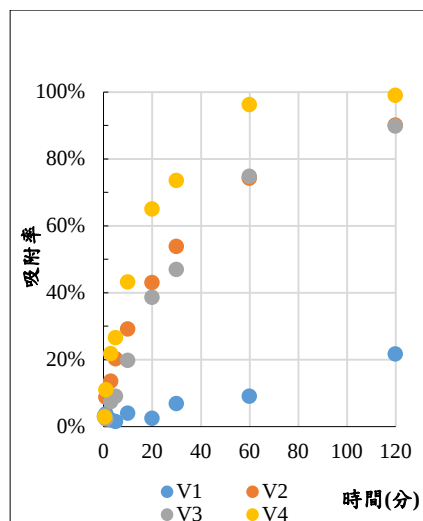


圖 5.3(a1) 陽離子交換樹脂對銅的吸附率(微量)

圖 5.3(a2) 陽離子交換樹脂對銅的吸附容量(微量)

圖 5.3(b1) 陽離子交換樹脂對銅的吸附率(低濃度)

圖 5.3(b2) 陽離子交換樹脂對銅的吸附容量(低濃度)

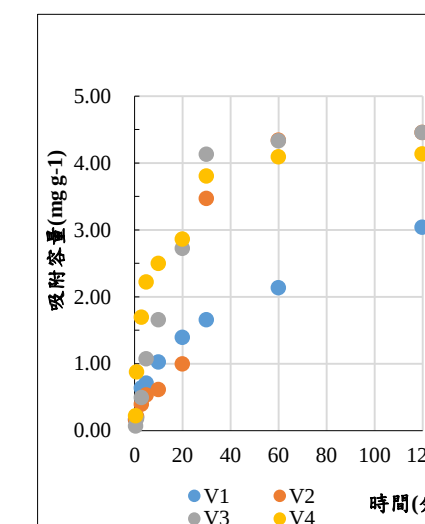
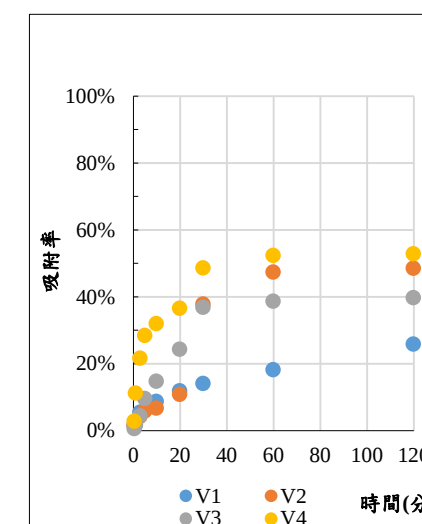
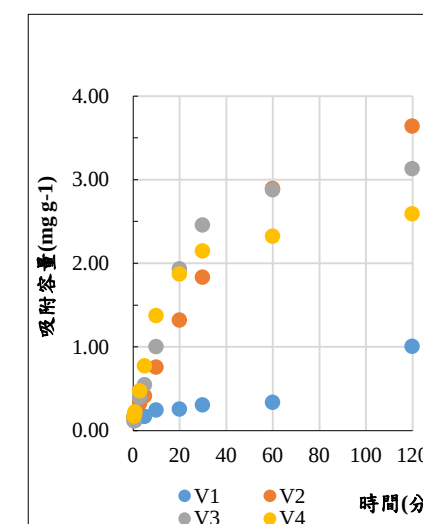
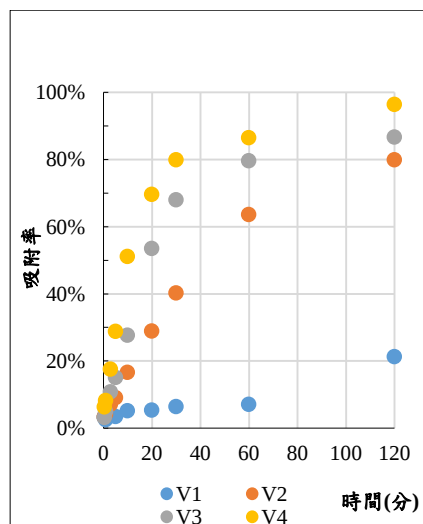


圖 5.3(c1) 陽離子交換樹脂對銅的吸附率(中濃度)

圖 5.3(c2) 陽離子交換樹脂對銅的吸附容量(中濃度)

圖 5.3(d1) 陽離子交換樹脂對銅的吸附率(高濃度)

圖 5.3(d2) 陽離子交換樹脂對銅的吸附容量(高濃度)

重金屬監測離子交換樹脂縮時膠囊之設計研發

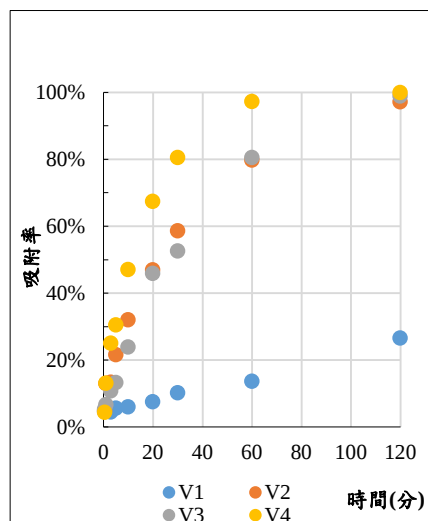


圖 5.4(a1) 陽離子交換樹脂對鉻的吸附率(微量)

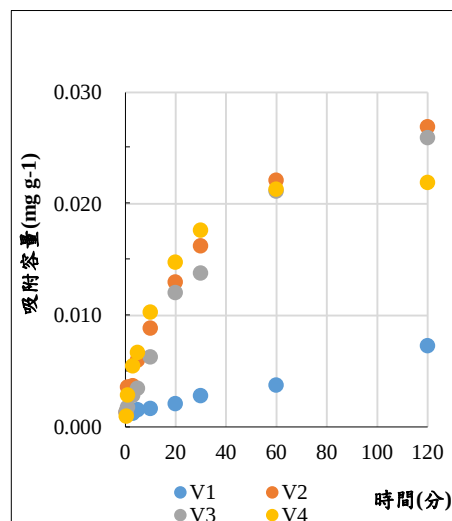


圖 5.4(a2) 陽離子交換樹脂對鉻的吸附容量(微量)

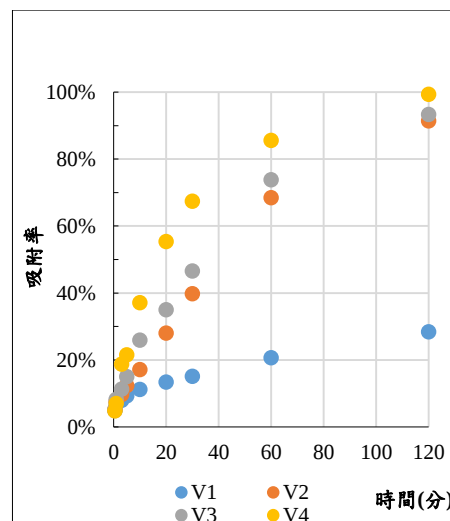


圖 5.4(b1) 陽離子交換樹脂對鉻的吸附率(低濃度)

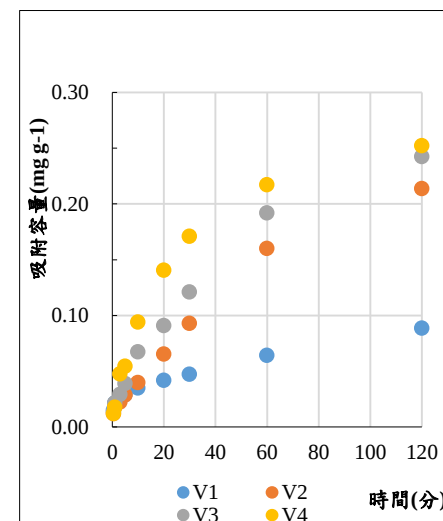


圖 5.4(b2) 陽離子交換樹脂對鉻的吸附容量(低濃度)

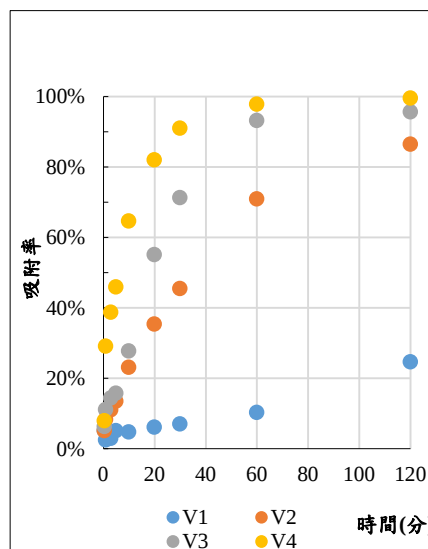


圖 5.4(c1) 陽離子交換樹脂對鉻的吸附率(中濃度)

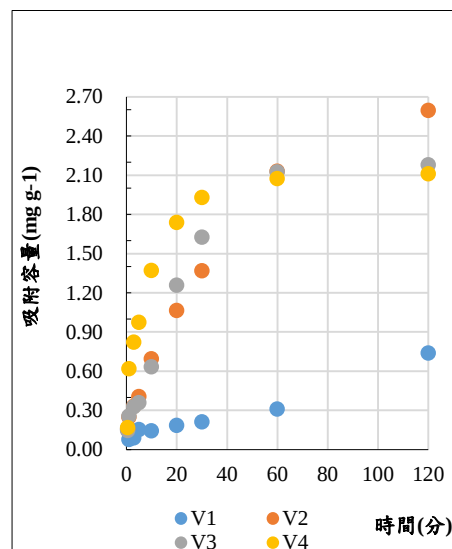


圖 5.4(c2) 陽離子交換樹脂對鉻的吸附容量(中濃度)

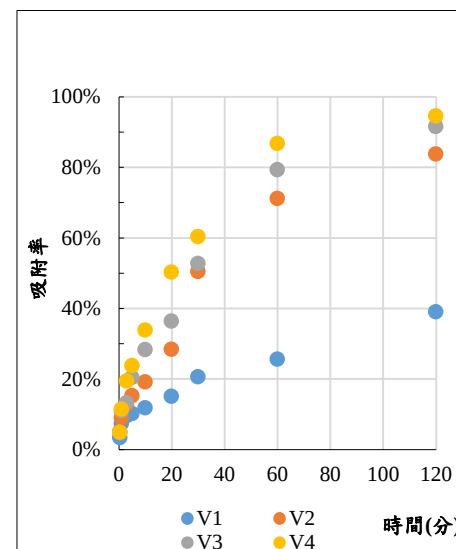


圖 5.4(d1) 陽離子交換樹脂對鉻的吸附率(高濃度)

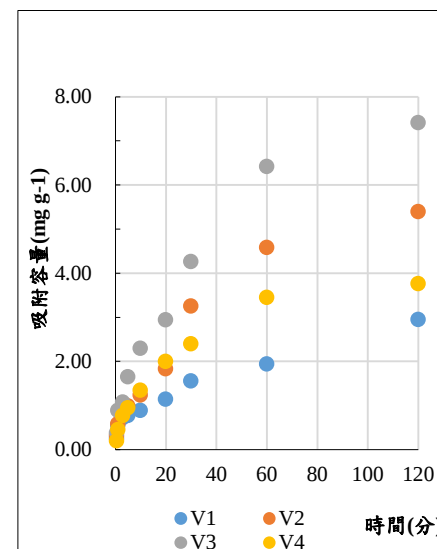


圖 5.4(d2) 陽離子交換樹脂對鉻的吸附容量(高濃度)

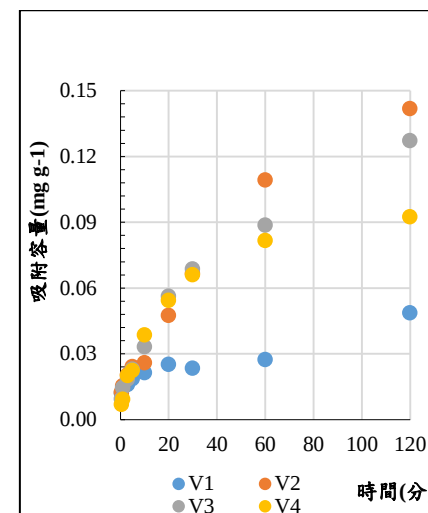
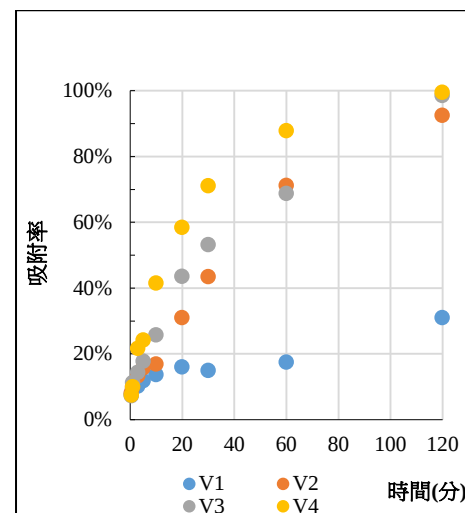
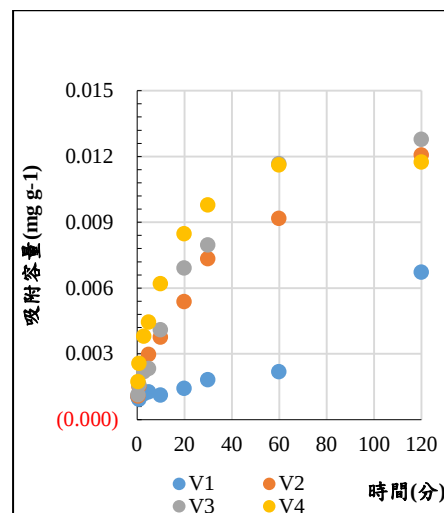
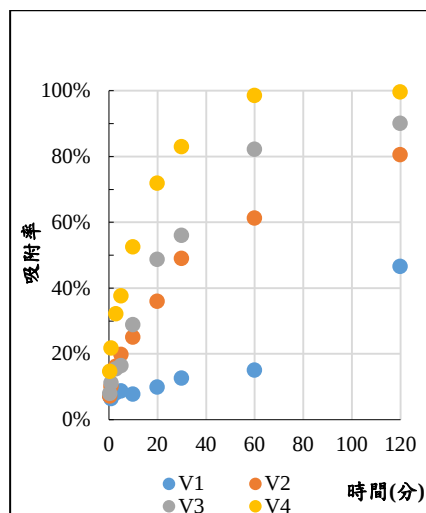


圖 5.5(a1) 陽離子交換樹脂對鎳的吸附率(微量) 圖 5.5(a2) 陽離子交換樹脂對鎳的吸附容量(微量) 圖 5.5(b1) 陽離子交換樹脂對鎳的吸附率(低濃度) 圖 5.5(b2) 陽離子交換樹脂對鎳的吸附容量(低濃度)

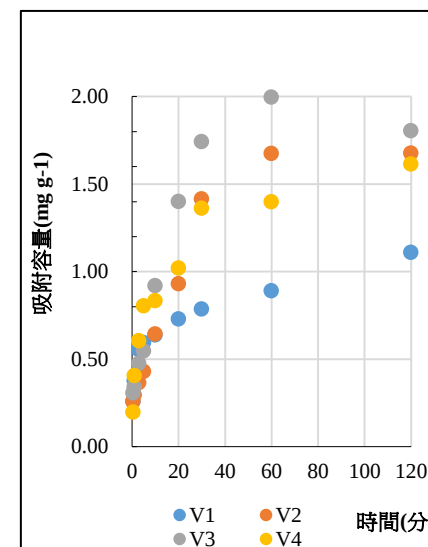
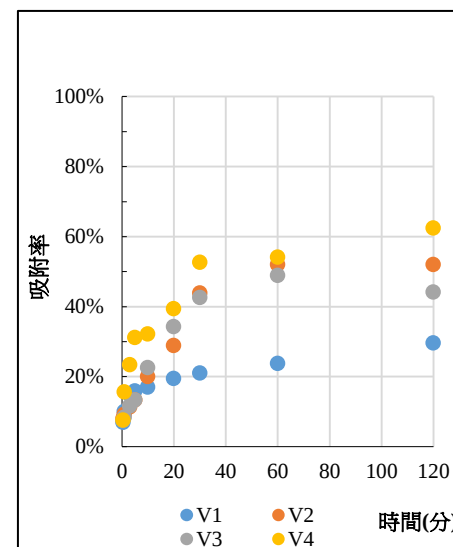
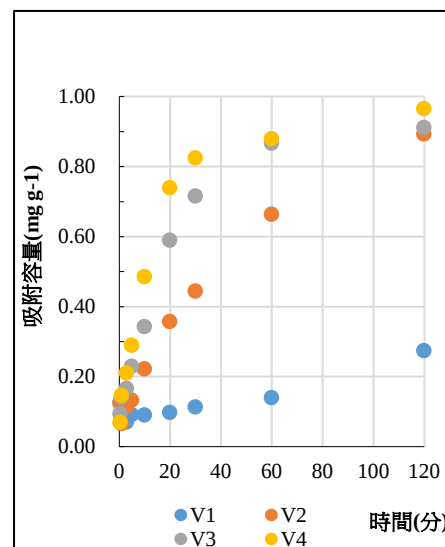
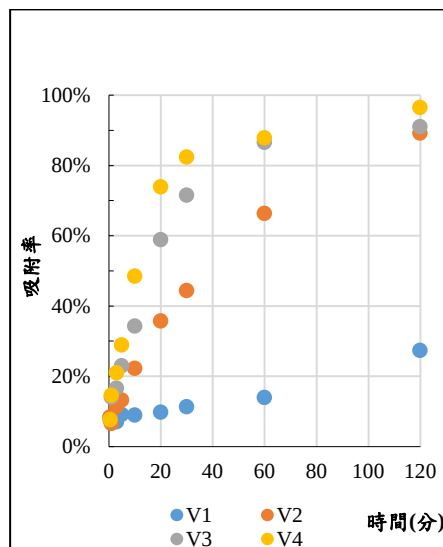


圖 5.5(c1) 陽離子交換樹脂對鎳的吸附率(中濃度) 圖 5.5(c2) 陽離子交換樹脂對鎳的吸附容量(中濃度) 圖 5.5(d1) 陽離子交換樹脂對鎳的吸附率(高濃度) 圖 5.5(d2) 陽離子交換樹脂對鎳的吸附容量(高濃度)

重金屬監測離子交換樹脂縮時膠囊之設計研發

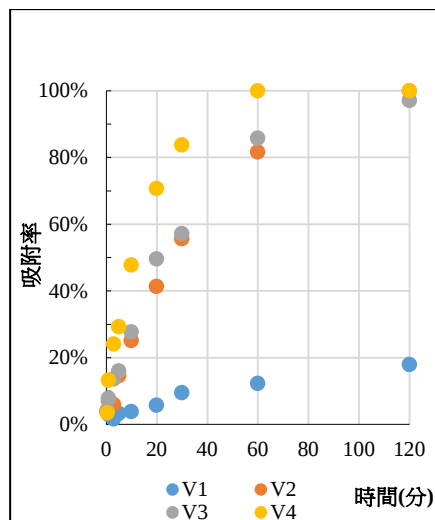


圖 5.6(a1) 陽離子交換樹脂對鈣的吸附率(微量)

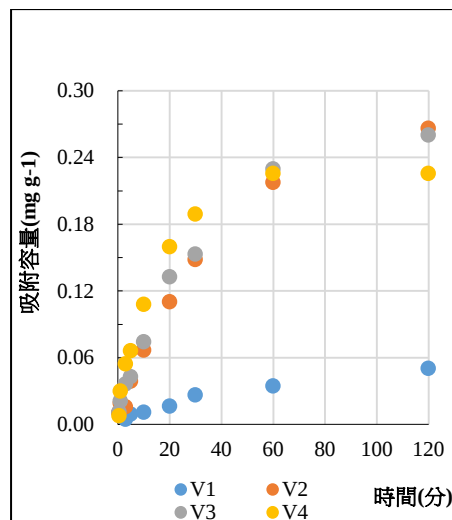


圖 5.6(a2) 陽離子交換樹脂對鈣的吸附容量(微量)

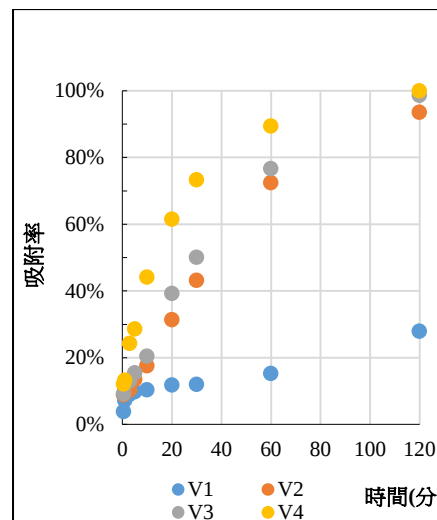


圖 5.6(b1) 陽離子交換樹脂對鈣的吸附率(低濃度)

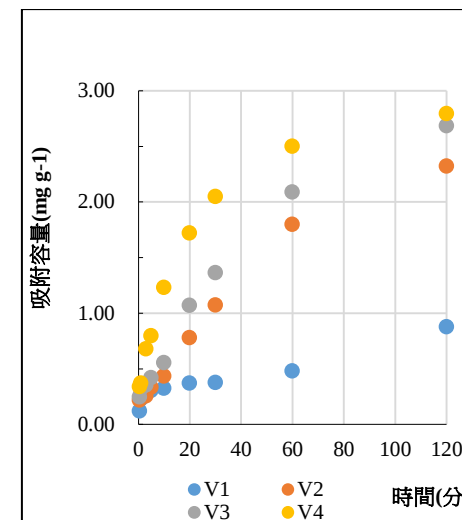


圖 5.6(b2) 陽離子交換樹脂對鈣的吸附容量(低濃度)

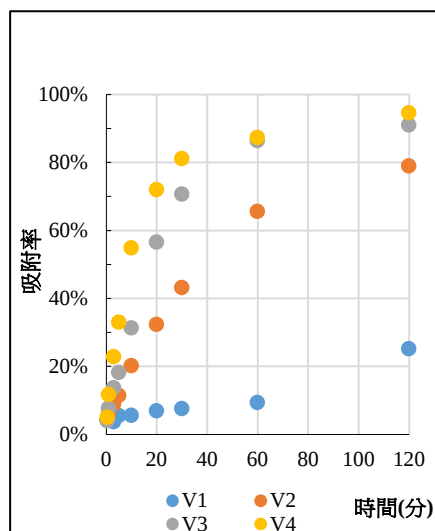


圖 5.6(c1) 陽離子交換樹脂對鈣的吸附率(中濃度)

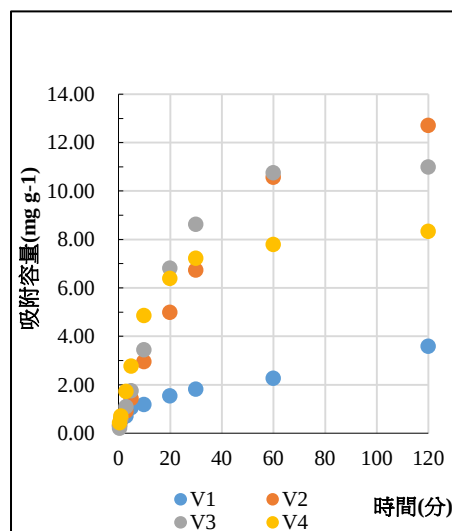


圖 5.6(c2) 陽離子交換樹脂對鈣的吸附容量(中濃度)

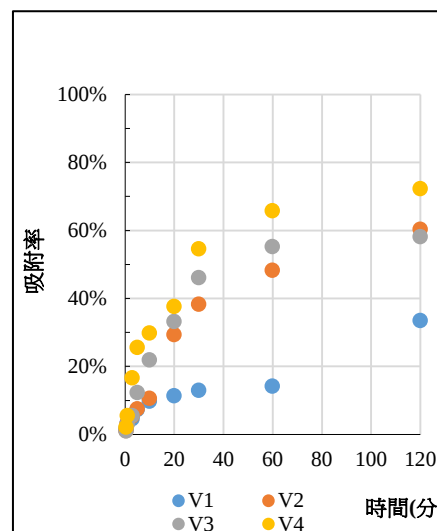


圖 5.6(d1) 陽離子交換樹脂對鈣的吸附率(高濃度)

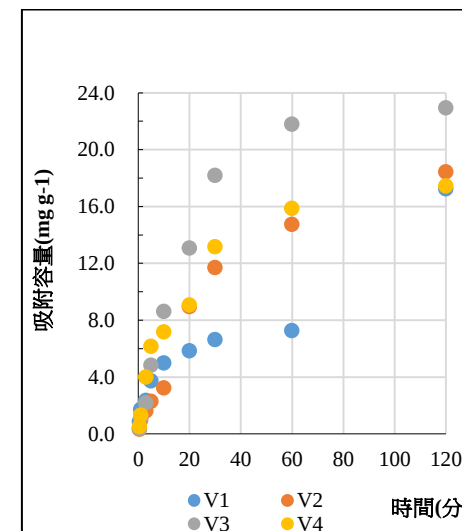


圖 5.6(d2) 陽離子交換樹脂對鈣的吸附容量(高濃度)

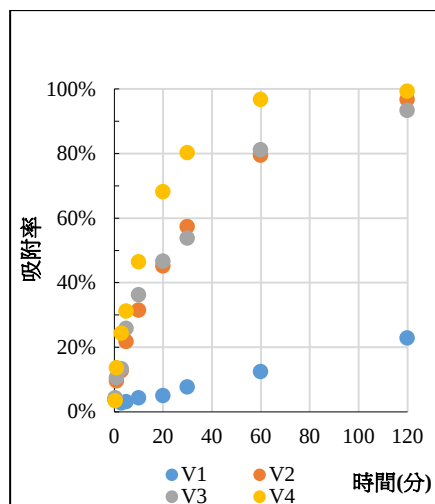


圖 5.7(a1) 陽離子交換樹脂對錳的吸附率(微量)

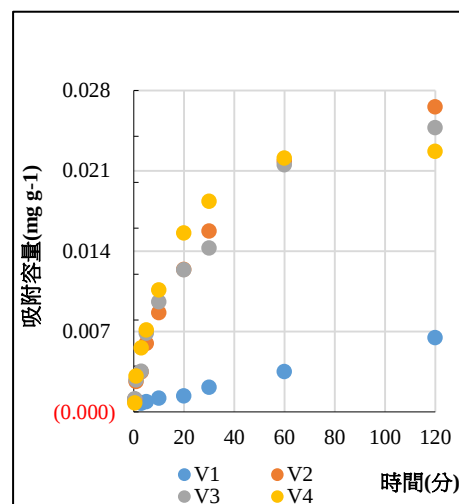


圖 5.7(a2) 陽離子交換樹脂對錳的吸附容量(微量)

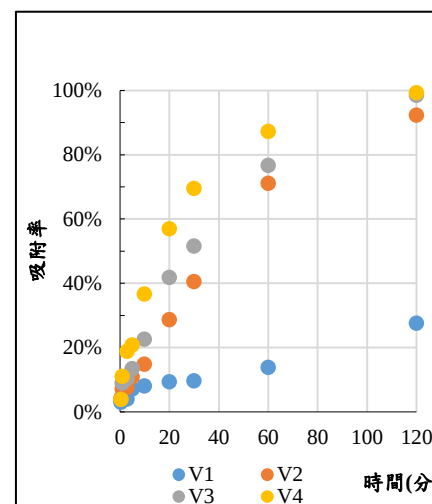


圖 5.7(b1) 陽離子交換樹脂對錳的吸附率(低濃度)

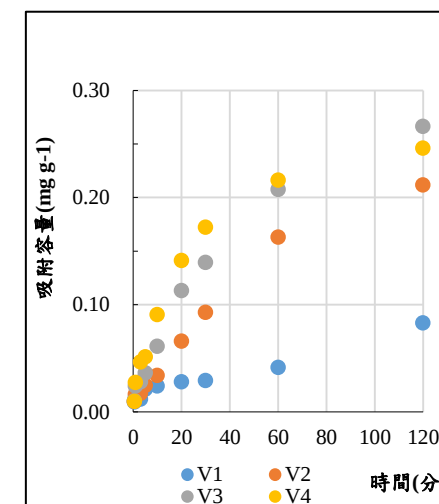


圖 5.7(b2) 陽離子交換樹脂對錳的吸附容量(低濃度)

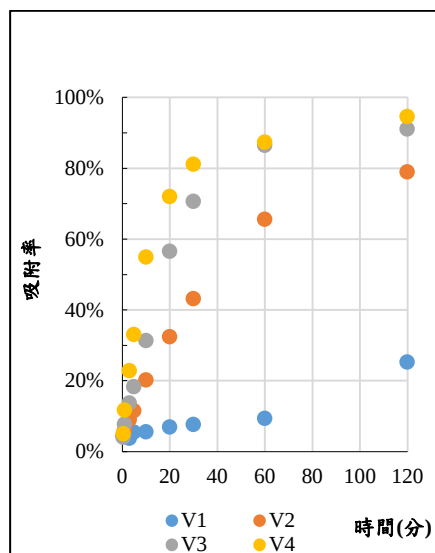


圖 5.7(c1) 陽離子交換樹脂對錳的吸附率(中濃度)

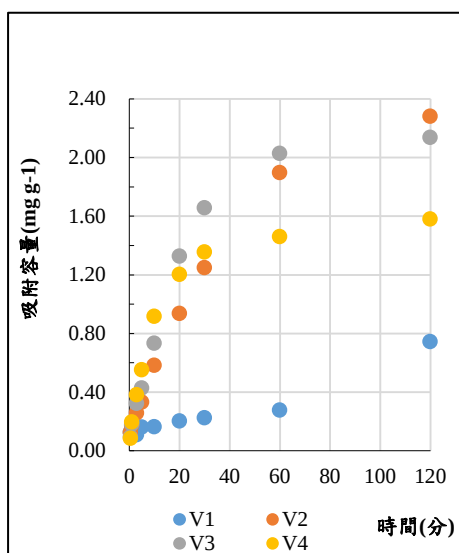


圖 5.7(c2) 陽離子交換樹脂對錳的吸附容量(中濃度)

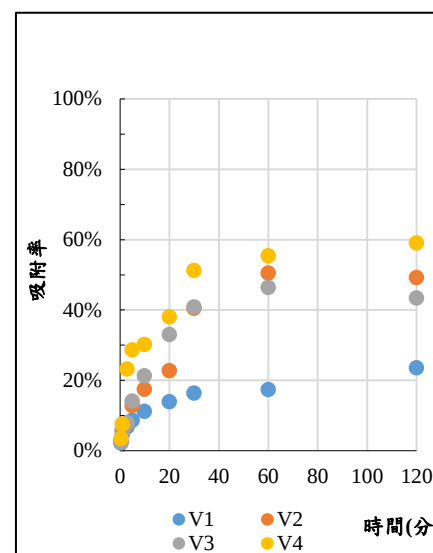


圖 5.7(d1) 陽離子交換樹脂對錳的吸附率(高濃度)

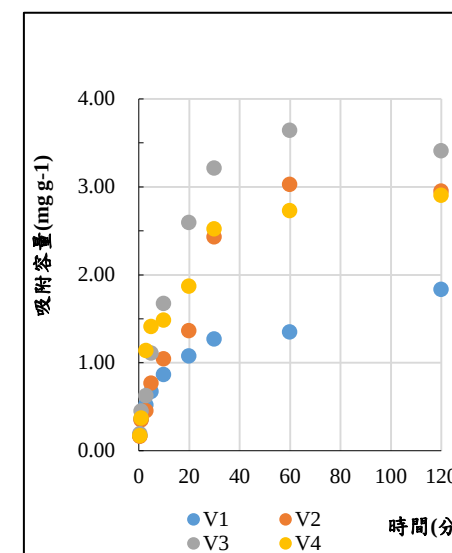


圖 5.7(d2) 陽離子交換樹脂對錳的吸附容量(高濃度)

重金屬監測離子交換樹脂縮時膠囊之設計研發

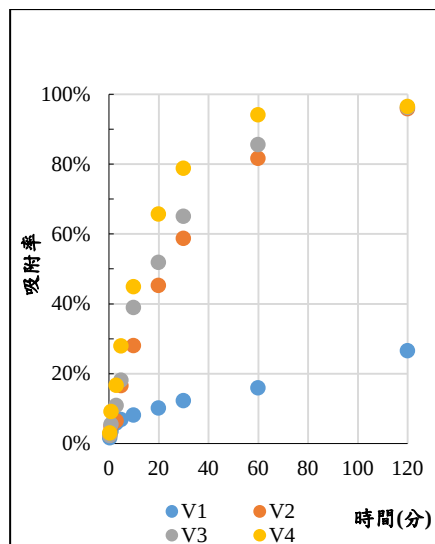


圖 5.8(a1) 陽離子交換樹脂對鈦的吸附率(微量)

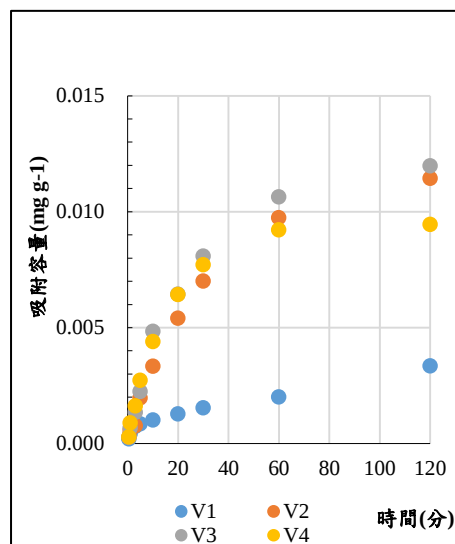


圖 5.8(a2) 陽離子交換樹脂對鈦的吸附容量(微量)

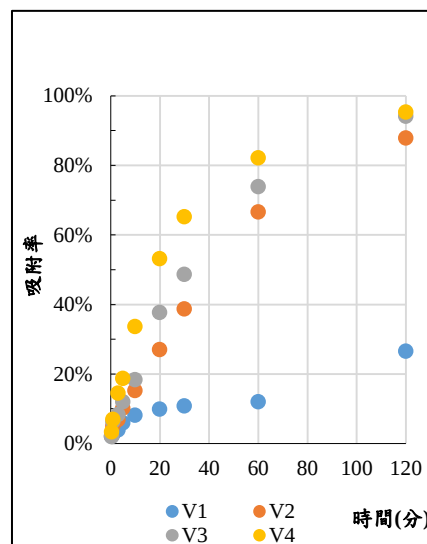


圖 5.8(b1) 陽離子交換樹脂對鈦的吸附率(低濃度)

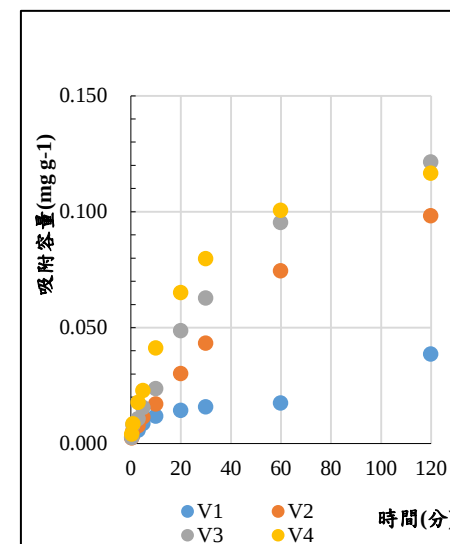


圖 5.8(b2) 陽離子交換樹脂對鈦的吸附容量(低濃度)

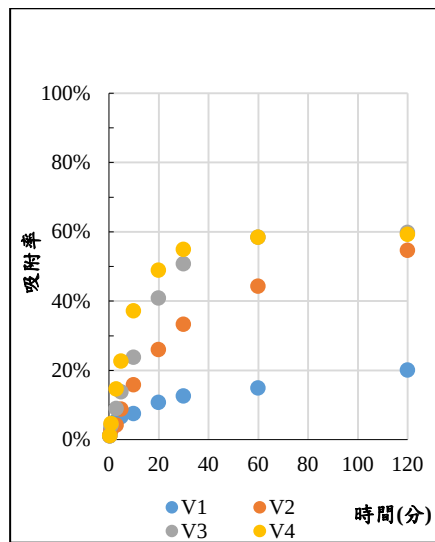


圖 5.8(c1) 陽離子交換樹脂對鈦的吸附率(中濃度)

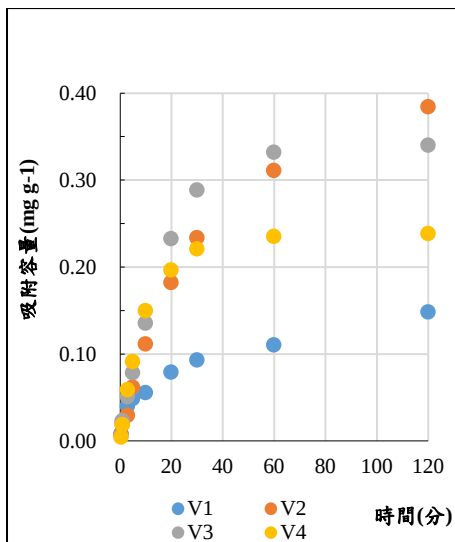


圖 5.8(c2) 陽離子交換樹脂對鈦的吸附容量(中濃度)

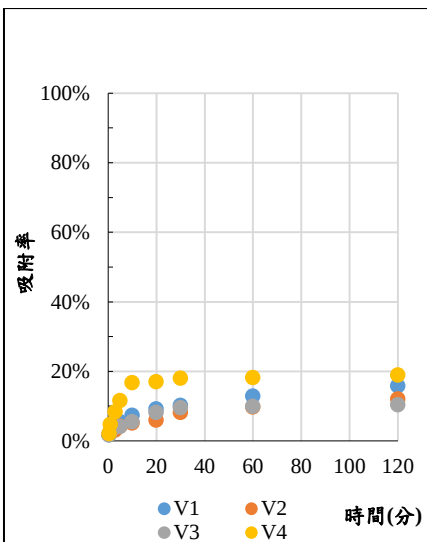


圖 5.8(d1) 陽離子交換樹脂對鈦的吸附率(高濃度)

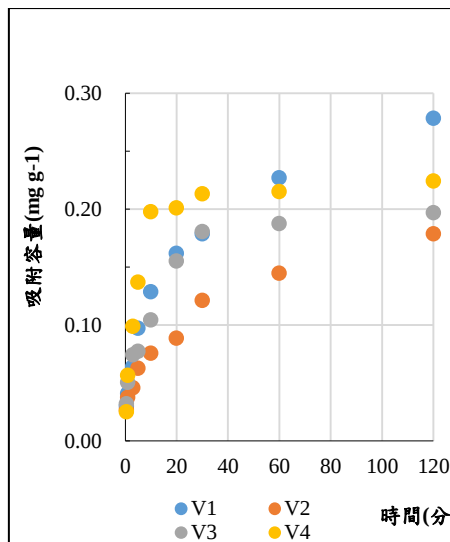


圖 5.8(d2) 陽離子交換樹脂對鈦的吸附容量(高濃度)

5.2 樹脂的重金屬濃度與 XRF 之關係

本實驗室試驗為一封閉系統，依據質量守恆原理，水體中重金屬濃度值的遞減現象，可轉換為陽離子交換樹脂的吸附重金屬的吸收率，如公式(a)所示。以鋅為例，針對同一濃度不同轉速的吸附結果比較，根據質量平衡計算陽離子交換樹脂的理論鋅濃度值。試驗結果發現該樹脂的吸附效率隨著時間的累積而增加。

$$q(\%) = \frac{C_0 - C_i}{C_0} * 100 \dots\dots\dots(a)$$

q: 樹脂吸附率(%)

C₀: 水體目標元素初始濃度

C_i: 水體目標元素採樣濃度

探究吸附實驗低濃度的鋅(轉速 100 rpm)為例)而言，其水體體積為 1 L，水體中鋅初始設計濃度為 5 mg L⁻¹(ICP 分析濃度為 5.0014 mg L⁻¹)，陽離子交換樹脂重量為 8.27 g(乾重)。待吸附實驗完成後，其 ICP 分析實驗結束的水體中鋅濃度值(吸附時間 2 小時)為 0.4033 mg L⁻¹，得知陽離子交換樹脂吸附鋅總量為 (5.0014-0.4033)*1 = 4.5981 mg，換算得知陽離子交換樹脂理論鋅濃度值為 4.5981/8.27*1000 = 555.997 ÷ 556.0 mg kg⁻¹，其對應 Itrax 分析的鋅濃度峰值為 64,197 cps(實驗試編碼 CD2V2，見表 5.2)。

以此類推，吸附完成之樹脂透過 ITrax 檢測分析可以得到各種重金屬所對應的峰值(如表 5.2 所示)，將上述資料彙整後，茲以微量鋅濃度的吸附試驗結果為例，在不同轉速條件下，其樹脂理論鋅濃度值與 ITrax 所對應的峰值結果如表 5.1 所示。

表 5.1 樹脂理論鋅濃度與 ITrax 檢測值關係一覽表

項目 \ 轉速(rpm)	50	100	150	200
ITrax(cps)	1,700	6,867	7,272	6,209
樹脂理論濃度(mg kg ⁻¹)	18.62	74.20	76.52	66.84

將不同濃度(微量、低、中與高濃度)的鋅納入比較後，發現不同鋅濃度與 Itrax 檢測所對應峰值的各自相關係數皆達 0.9 以上(如圖 5.9(a)至圖 5.9(d))，唯一缺點是陽離子交換樹脂的理論鋅濃度值範圍不夠大。針對同一濃度的實驗條件，即便不同轉速所造成吸附結果的差異性並不大，主因

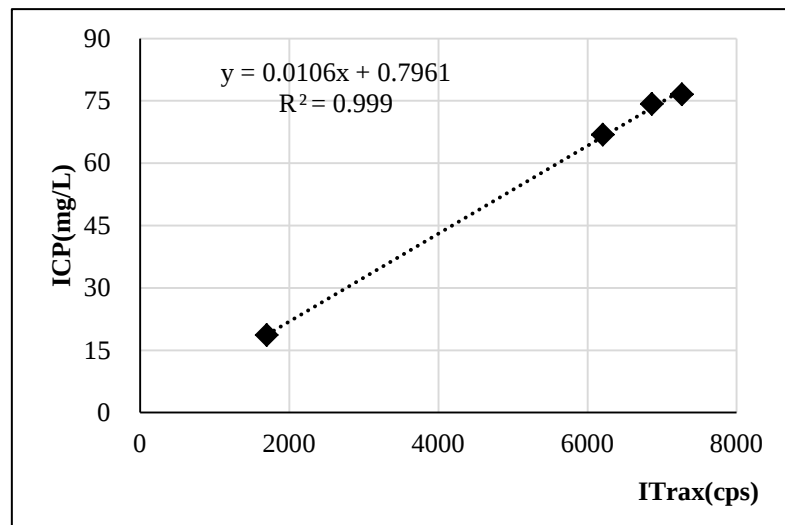


圖 5.9(a)微量鋅(*0.1)對應 ITrax 數據

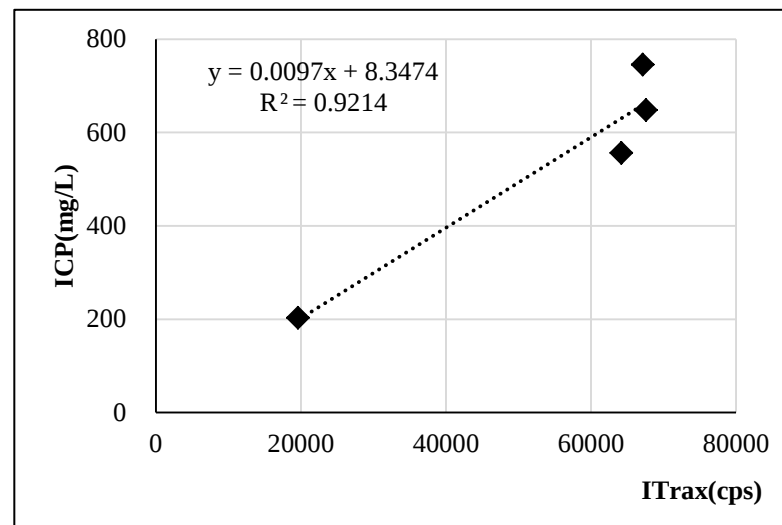


圖 5.9(b)低濃度鋅(*1)對應 ITrax 數據

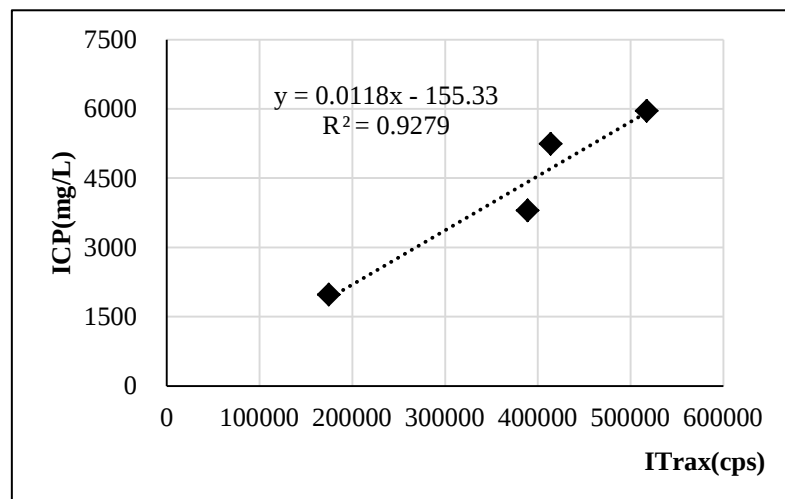


圖 5.9(c)中濃度鋅(*10)對應 ITrax 數據

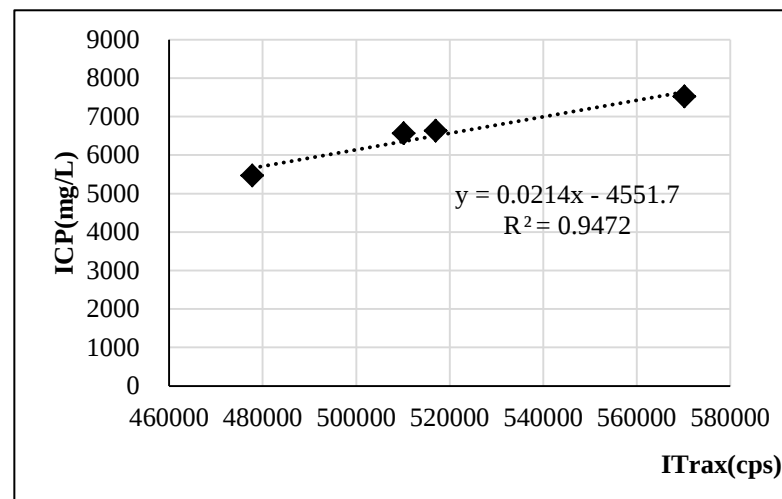


圖 5.9(d)高濃度鋅(*20)對應 ITrax 數據

表 5.2 實驗室樹脂吸附試驗 ITrax 檢測分析結果一覽表

(單位: cps)

重金屬 編碼項目		Ca	Ti	Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	Pb
實驗室 編碼	ITrax 編碼								
CD1V1	C01	273	38	368	358	1,451	2,211	1,700	72
CD2V1	C02	1,996	258	1,640	2,205	3,626	10,569	19,622	2,191
CD3V1	C03	10,478	1,016	13,540	18,384	24,036	87,022	175,081	22,017
CD4V1	C04	37,819	1,705	36,749	39,602	49,631	177,624	372,605	51,573
CD1V2	C05	843	52	791	954	1,901	4,249	6,867	414
CD2V2	C06	6,182	779	4,186	5,977	8,432	27,370	64,197	6,587
CD3V2	C07	34,573	2,549	43,377	55,911	69,994	247,512	517,859	59,466
CD4V2	C08	47,116	1,364	71,966	63,526	75,899	266,333	517,036	83,504
CD1V3	C09	787	92	840	1,006	1,983	4,133	7,272	344
CD2V3	C10	6,132	776	3,911	5,738	7,972	26,597	67,177	6,221
CD3V3	C11	27,186	2,168	33,452	44,809	55,771	198,234	414,385	47,079
CD4V3	C12	55,145	1,433	94,334	67,556	78,248	267,725	570,240	94,278
CD1V4	C14	658	83	718	807	1,947	3,776	6,209	380
CD2V4	C15	7,235	924	4,876	6,956	9,929	34,291	67,598	7,649
CD3V4	C16	26,963	1,914	39,741	42,238	52,865	189,287	389,376	51,182
CD4V4	C17	40,684	1,397	61,046	57,157	70,286	244,658	510,227	73,226

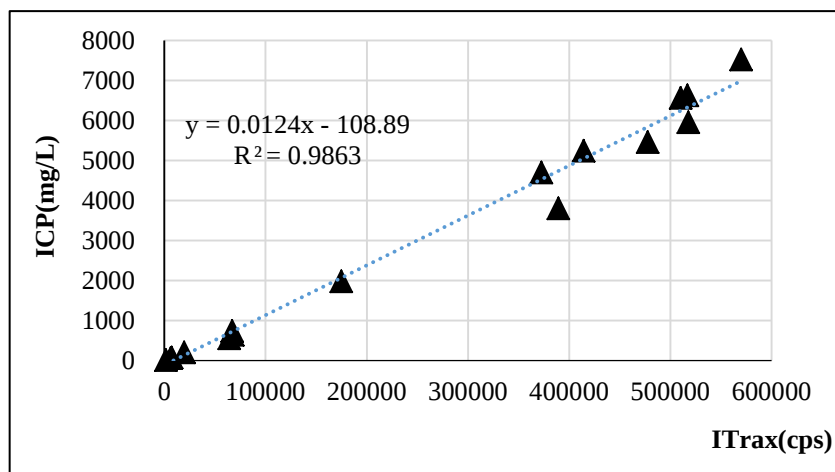


圖 5.10 含鋅的樹脂對應 ITrax 數據關係圖

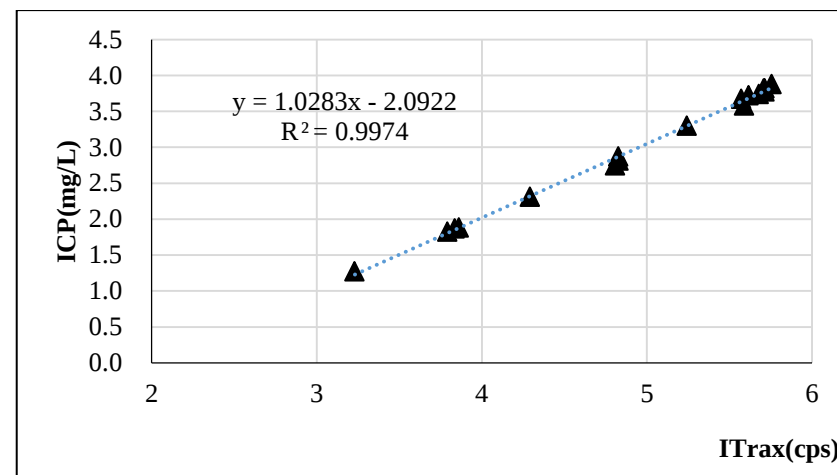


圖 5.11 含鋅的樹脂對應 ITrax 數據對數關係圖(以 10 為底)

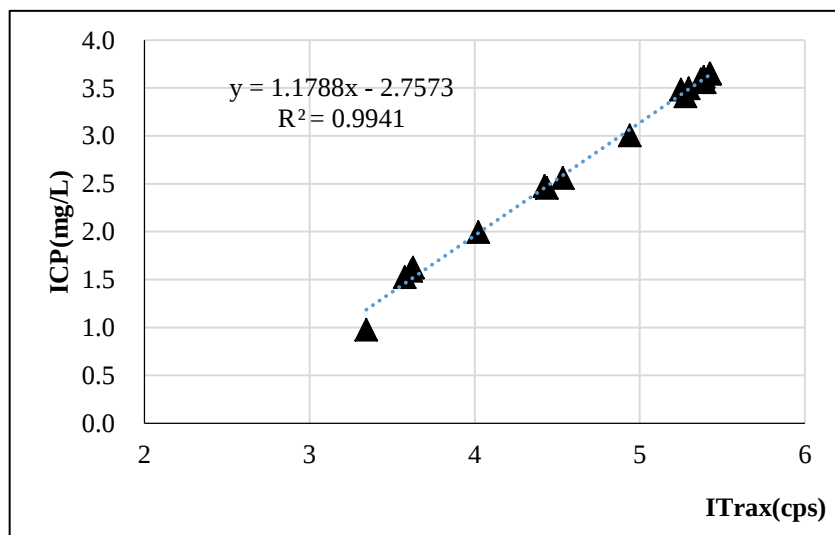


圖 5.12 含銅的樹脂對應 ITrax 數據對數關係圖(以 10 為底)

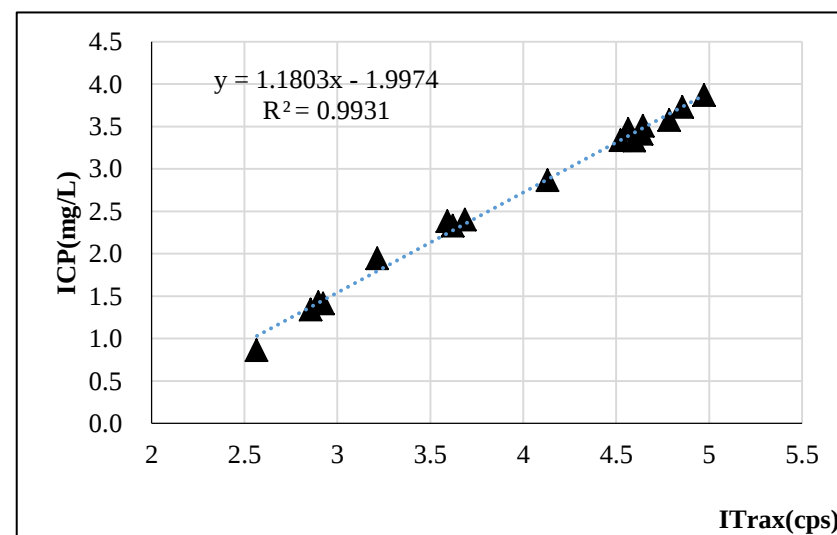


圖 5.13 含鉻的樹脂對應 ITrax 數據對數關係圖(以 10 為底)

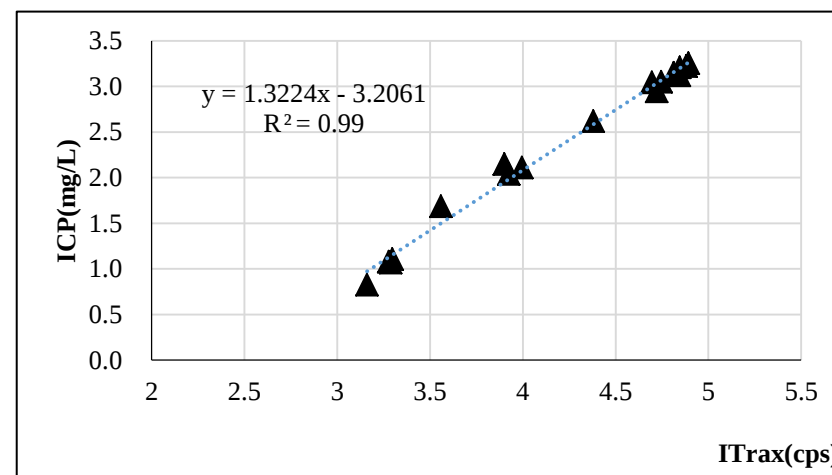
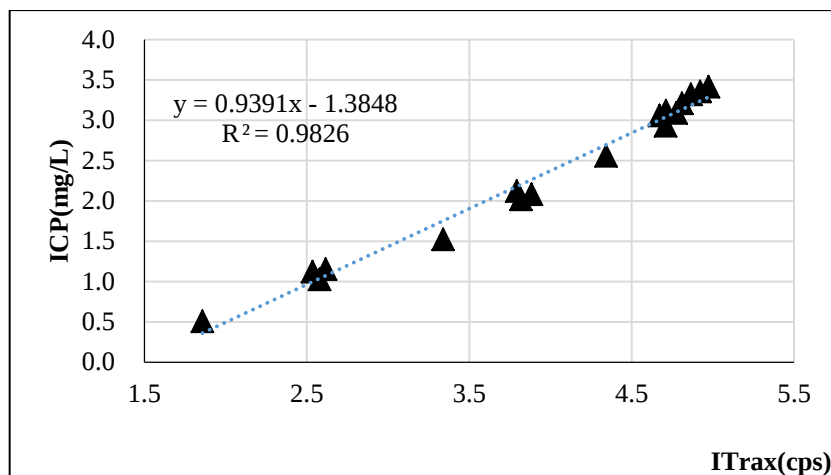


圖 5.14 含鉛的樹脂對應 ITrax 數據對數關係圖(以 10 為底) 圖 5.15 含鎳的樹脂對應 ITrax 數據對數關係圖(以 10 為底)

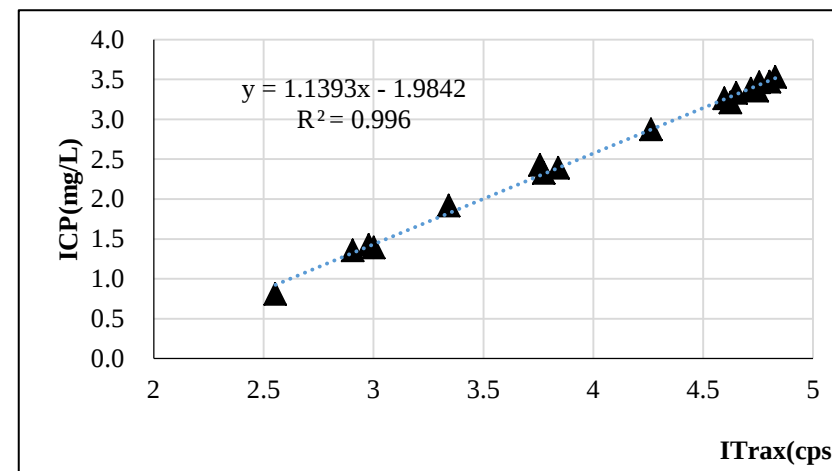
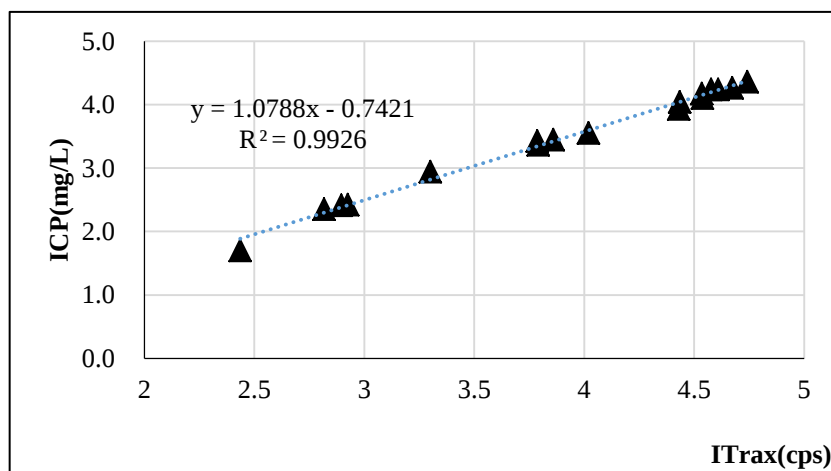


圖 5.16 含鈣的樹脂對應 ITrax 數據對數關係圖(以 10 為底) 圖 5.17 含錳的樹脂對應 ITrax 數據對數關係圖(以 10 為底)

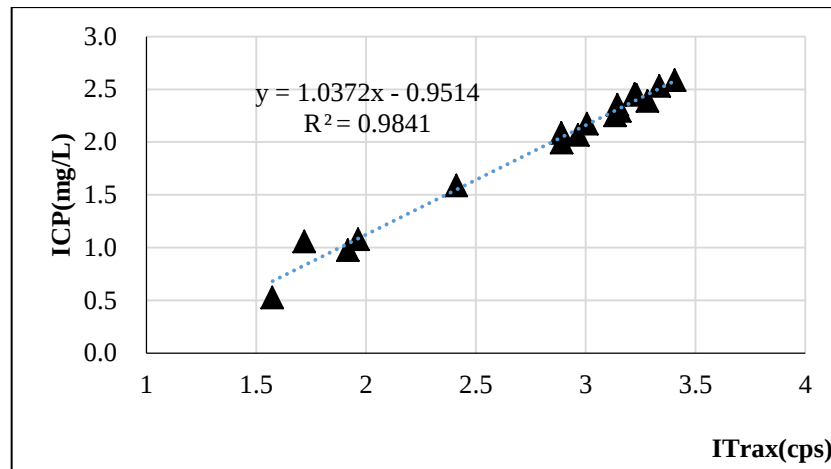


圖 5.18 含鈦的樹脂對應 ITrax 數據對數關係圖(以 10 為底)

是因為樹脂吸附水溶液中重金屬的反應時間(僅需 30 分鐘即可達 50% 以上的吸附效率)相對於實驗設計的吸附時間(2 小時結束)是短暫地。

將所有不同鋅濃度的吸附試驗數值整合在一起後發現，陽離子交換樹脂的理論鋅濃度值範圍介於 $18.62 \sim 7,518 \text{ mg kg}^{-1}$ ，且與 Itrax 檢測峰值的相關係數高達 0.9863(如圖 5.10 所示)，進一步將數據資料取以 10 為底的對數比較後，兩者相關係數更可提高至 0.9974(如圖 5.11 所示)。重複上述步驟，分別針對銅、鉻、鉛、鎳、鈣、錳與鈦做比較，其結果分別如圖 5.12 至圖 5.18 所示(以 10 為底的對數)。比較陽離子交換樹脂理論目標元素濃度值($\log_{10}$)與對應 XRF 檢測峰度值($\log_{10}$)的關係，發現兩者的線性相關係數(R^2)皆達 0.98 以上(如表 5.3 所示)。樹脂所吸附的目標元素濃度中，以鈣的涵蓋範圍為最廣，介於 $50 \sim 22,933 \text{ mg kg}^{-1}$ 之間；其次是鋅，介於 $18 \sim 7,518 \text{ mg kg}^{-1}$ 之間(如表 5.3 所示)。此一結果說明，XRF(台大地質系 I-Trax)在分析交換樹脂所含重金屬元素含量的準確性符合本計畫所需的要求。

表 5.3 陽離子樹脂吸附目標元素濃度與 I-Trax 峰度值線性回歸一覽表

序號	目標元素	a	b	R^2	Itrax(cps* 10^3)	ICP(mg kg^{-1})
1	鋅	1.0283	-2.0922	0.9974	1.70 – 570	18 – 7,518
2	銅	1.1788	-2.7573	0.9941	2.20 – 266	9.5 – 4,453
3	鉛	0.9391	-1.3848	0.9826	0.07 – 94	3.2 – 2,584
4	鈣	1.0788	-0.7421	0.9926	0.27 – 55	50 – 22,933
5	錳	1.1393	-1.9840	0.9960	0.36 – 68	6.5 – 3,408
6	鎳	1.3224	-3.2061	0.9900	1.50 – 78	6.7 – 1,805
7	鉻	1.1803	-1.9974	0.9931	0.37 – 94	3.2 – 2,584
8	鈦	1.0372	-0.9514	0.9841	0.04 – 2.56	3.4 – 384

註： $y = a \cdot x + b$ $y : \log_{10}(\text{ICP})$
 $x : \log_{10}(\text{ITrax})$

5.3 「樹脂縮時記錄膠囊」現地試驗

本研究除了進行實驗室交換樹脂的陽離子吸附實驗之外，選定彰化縣東西二、三圳灌排系統區域做為「樹脂縮時記錄膠囊」現地實驗測試地點，涵蓋面積約 8.8 平方公里。針對區域內灌排渠道規劃 151 個陽離子交換樹脂監測點位(如圖 5.21 所示)，每一個點位投放 3 個「樹脂縮時記錄膠囊」(計 453 個)，該膠囊放置於預監測點位的規劃停留時間分別為 7、14 與 21 天；陰離子僅規劃 30 個監測點位(如圖 5.22 所示)。回收之「樹脂縮時記錄膠囊」的樹脂在風乾後，將各個監測點位之樹脂個別充分混合均勻後，取適當樣本進行 X-射線螢光光譜儀檢測重金屬含量，掃描分析元素超過 12 種以上，包含鈣、鋁、鐵、鈦、鉀、鎘、鉻、鉛、鋅、銅、砷、錳與鎳等。本計畫並於 2015 年 3 月初進行彰化和美鎮進行現勘作業(如圖 5.19 所示)，透過 GPS 手持設備紀錄渠道現況與周圍環境條件，作為後續挑選「樹脂縮時記錄膠囊」監測位置參考之依據。本計畫現地試驗時程相關如圖 5.20 所示，現勘照片與點位紀錄資料詳見附錄一。



圖 5.19 放置監測膠囊現勘點位(A42; 104-03-03)

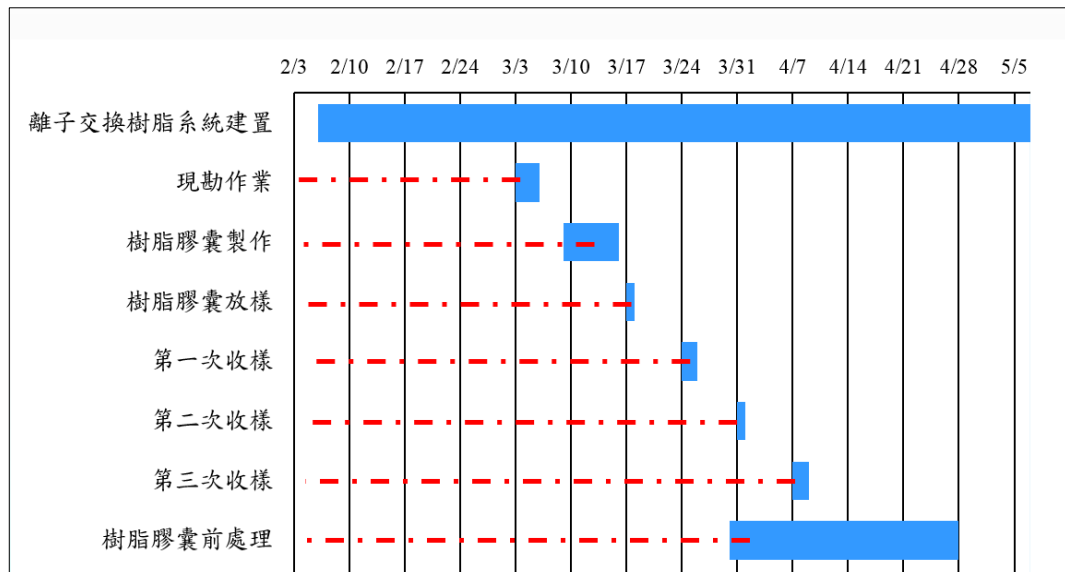


圖 5.20 「樹脂縮時記錄膠囊」現地試驗時程圖

經由現勘過程得知東西二、三圳灌排系統區域內渠道錯綜複雜，不時發現小型工廠林立於農田之中，增添「樹脂縮時記錄膠囊」選址的困難度。佈點位置的首要考量是研究區域內的渠道是否有水在流動，本計畫參酌「彰化農田水利會各埤圳系統停止引水日程表」作為「樹脂縮時記錄膠囊」監測點位佈設之考量。再者，工廠所在位置的上、下游渠道也是監測膠囊佈設的重點。因此，將研究區域內規劃投放點位的現有渠道依功能分為 3 類，分別為灌溉渠道(I：紅色)、排水渠道(D：藍色)與灌排渠道(MID：黃色)。統計後得知監測點位屬於灌溉渠道有 62 點；屬於排水渠道有 55 點；屬於灌排渠道則有 34 點(如圖 5.21 所示)。待「樹脂縮時記錄膠囊」的 XRF 分析數據彙整後即可依據空間分佈的相關性進行進一步分析。

在完成現勘作業後，本計畫輔以地理資訊系統併搭配交通路線，提昇投放「樹脂縮時記錄膠囊」至監測環境的效率，規劃出 A,B 與 C 三條放樣路線，路線 A 涵蓋 67 個點位，路線 B 涵蓋 53 個點位，路線 C 則涵蓋 31 個點位(如圖 5.23 所示)，共計 151 個點位，每個點位放置 3 個陽離子樹脂膠囊，另外從其中挑選 30 個點位各放置一個陰離子樹脂膠囊(如圖 5.22 所示)。

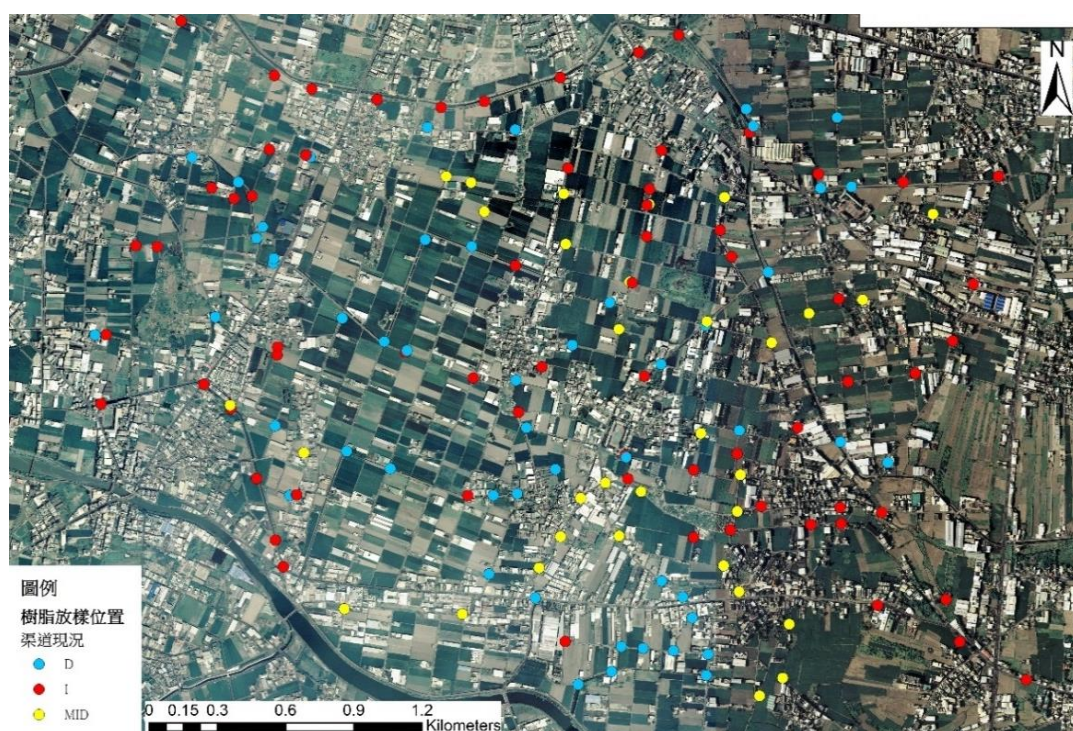


圖 5.21 放置「陽離子樹脂縮時記錄膠囊」點位渠道現況示意圖

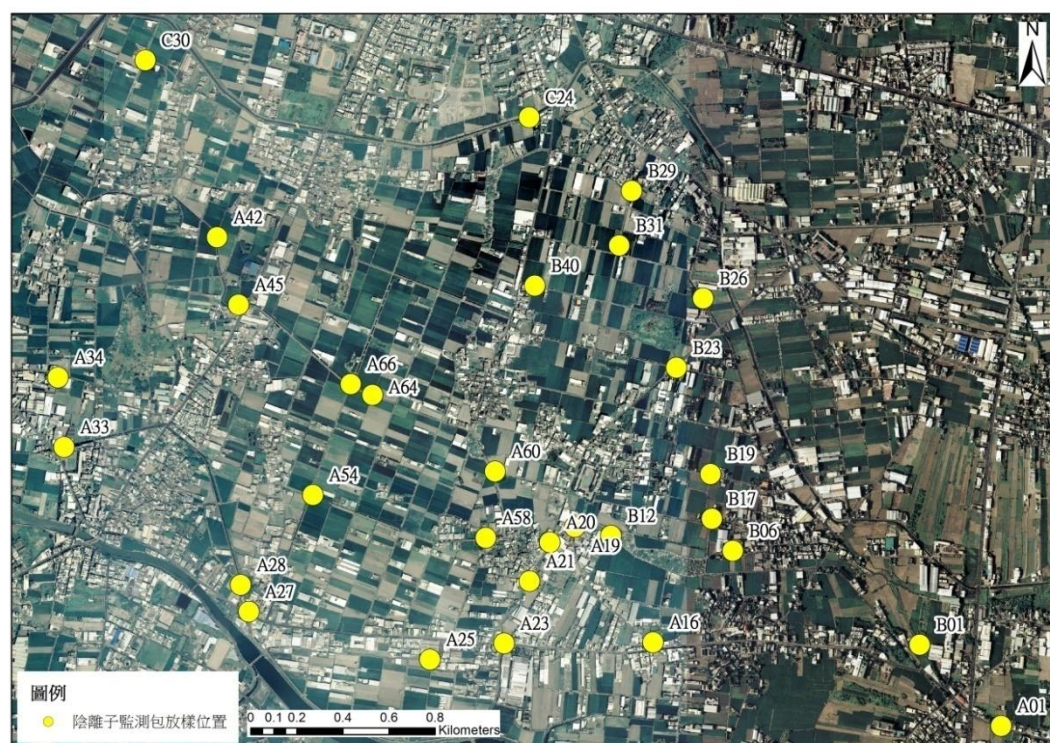


圖 5.22 放置「陰離子樹脂縮時記錄膠囊」點位現況示意圖

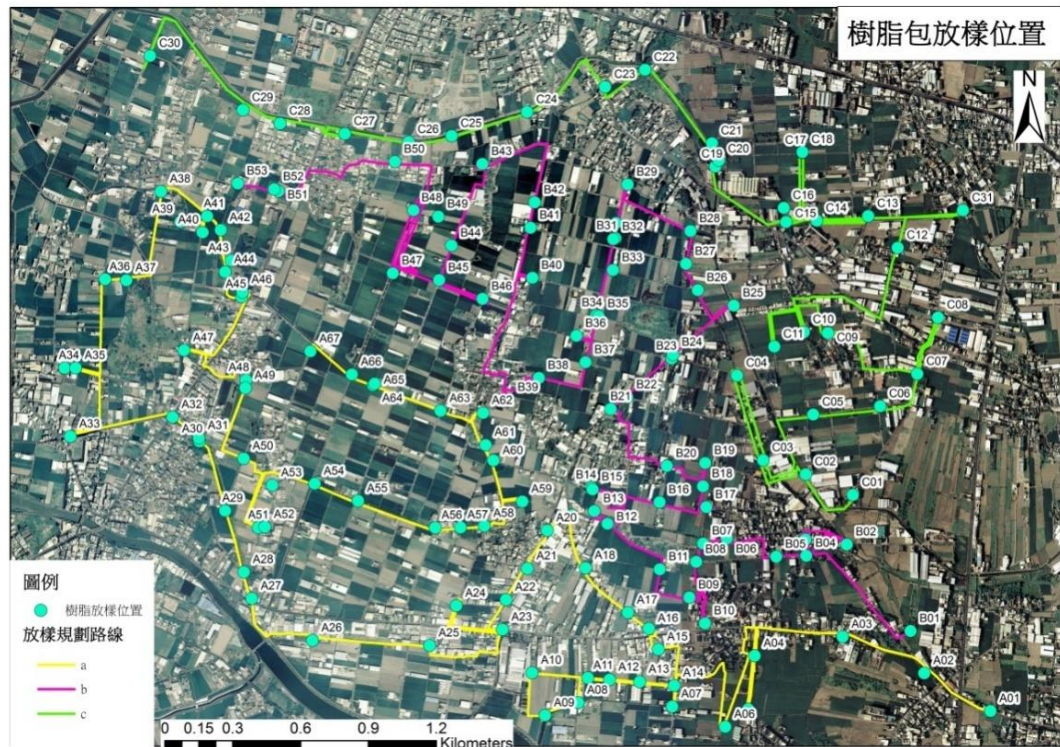


圖 5.23 「樹脂縮時記錄膠囊」放樣位置及規劃路線

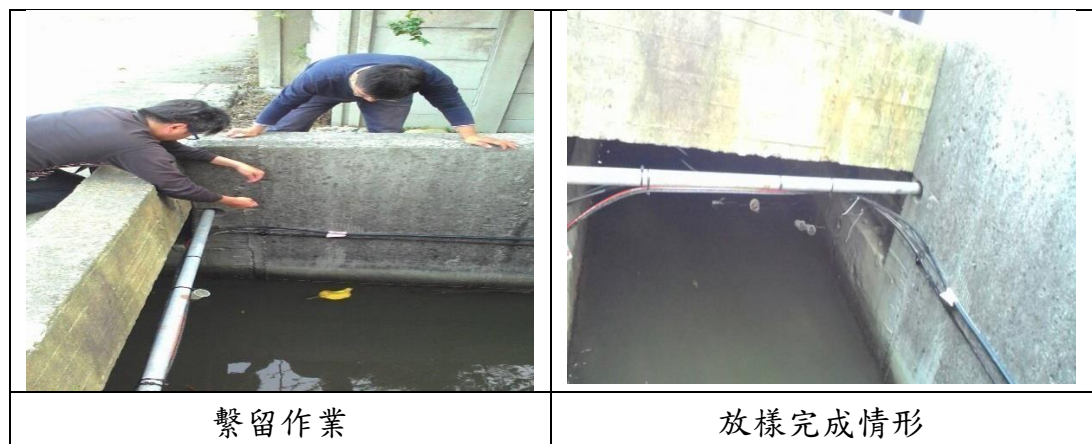


圖 5.24 A01「樹脂縮時記錄膠囊」放樣過程(104.03.17)

本計畫監測點位數量計 151 個，「樹脂縮時記錄膠囊」投放個數多達 483 個(每個點位含 3 個膠囊)(每個點位含 3 個膠囊)，礙於篇幅，茲就「樹脂縮時記錄膠囊」現地投放現況情形列舉如圖 5.24 所示。待該膠囊放置一個星期後開始進行 3 次的膠囊收樣作業列舉如圖 5.25、圖 5.26、圖 5.27 與圖 5.28 所示，每隔 7 天在各點位回收一個樹脂膠囊，直至所有膠囊全部回收完畢，計執行 3 次回收作業。本計畫膠囊內樹脂的功能僅透過交換作用作為紀錄環境水體中重金屬的變化情形，後續並無需進行樹脂之再生脫附等行為之討論。

2015 年 3 月 17 日開始進行膠囊投放作業，花費 4 個工作天，3 月 24 日開始第一次收樣作業，第二次收樣作業為 3 月 31 日開始，最後一次收樣作業為 4 月 7 日開始。表 5.4 為陰、陽離子「樹脂縮時記錄膠囊」放樣及收樣統計表，總共放置 453 個陽離子樹脂膠囊與 30 個陰離子樹脂膠囊，最後收回 404 個陽離子樹脂膠囊，回收率為 89.2%；陰離子樹脂膠囊則收回 28 個，回收率為 93.9%。表 5.5 為 3 次收樣陽離子樹脂膠囊統計表，第一次收樣收回 141 個陽離子樹脂膠囊，回收率為 93.4%；第二次收樣收回 138 個陽離子樹脂膠囊，回收率為 91.4%；最後一次收樣收回 125 個陽離子樹脂膠囊，回收率為 82.8%。

表 5.4 陰、陽離子「樹脂縮時記錄膠囊」放樣及收樣統計表

離子種類 項目	陽離子	陰離子
個數*	453/404	30/28
回收率	89.2%	93.3%

個數*：(放樣/收樣)

表 5.5 陽離子樹脂膠囊回收作業統計表

	第一次	第二次	第三次
作業日期	03/24-03/26	03/31-04/01	04/07-04/09
個數*	151/141	151/138	151/125
回收率	93.4%	91.4%	82.8%
監測天數(天)	7	14	21

個數*：(放樣/收樣)

	
點位 A23 (104.03.17)	點位 A45 (104.03.17)
	
點位 B01 (104.03.17)	點位 B23 (104.03.17)
	
點位 C20 (104.03.18)	點位 C25 (104.03.17)

圖 5.25 「樹脂縮時記錄膠囊」放置情形

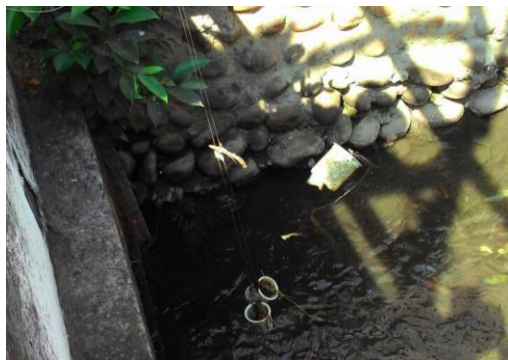
	
點位 A23 (104.03.17)	點位 A45 (104.03.17)
	
點位 B01 (104.03.17)	點位 B23 (104.03.17)
	
點位 C20 (104.03.18)	點位 C25 (104.03.17)

圖 5.26 「樹脂縮時記錄膠囊」第一次收樣情形

	
點位 A23 (104.03.17)	點位 A45 (104.03.17)
	
點位 B01 (104.03.17)	點位 B23 (104.03.17)
	
點位 C20 (104.03.18)	點位 C25 (104.03.17)

圖 5.27 「樹脂縮時記錄膠囊」第二次收樣情形

	
點位 A23 (104.03.17)	點位 A45 (104.03.17)
	
點位 B01 (104.03.17)	點位 B23 (104.03.17)
無資料	
點位 C20 (104.03.18)遭移除	點位 C25 (104.03.17)

圖 5.28 「樹脂縮時記錄膠囊」第三次收樣情形

將回收的「樹脂縮時記錄膠囊」以清水沖洗(如圖 5.29 所示)，待附著在外面的泥土洗滌去除乾淨後，將其放置在鐵架上曬乾(如圖 5.30 所示)，再以夾鏈袋封裝保存。



圖 5.29 「樹脂縮時記錄膠囊」洗滌示意圖



圖 5.30 「樹脂縮時記錄膠囊」靜置風乾示意圖

5.4 「樹脂縮時記錄膠囊」監測結果

本研究計畫現地試驗已完成「樹脂縮時記錄膠囊」投放與回收作業，其中，陽離子「樹脂縮時記錄膠囊」3次收樣總數量達404個($n=453$)，平均回收率達89.2%，個別收樣個數與回收率如表5.4所示；陰離子「樹脂縮時記錄膠囊」監測時間為7天，收樣數量28個，回收率為93.3%(如表5.4所示)。

根據本計畫第5.2節所建立實驗室樹脂吸附重金屬濃度值與其Itrax分析峰值的線性關係式，將現地監測之「樹脂縮時記錄膠囊」吸附的重金屬峰度值轉換成為濃度值後，利用統計軟體(SPSS)分別分析3次所得之數據資料，其敘述統計資料分別如表5.6、表5.7與表5.8所示。其中只有鈣所得之濃度值係利用外差公式得知，其餘絕大部分現地監測樹脂所含重金屬的濃度演算過程均在實驗室吸附試驗設計的濃度範圍內。其中，平均值最大的金屬元素為鈣，分別達 $43,392 \text{ mg kg}^{-1}$ (7天)、 $52,598 \text{ mg kg}^{-1}$ (14天)以及 $58,472 \text{ mg kg}^{-1}$ (21天)。其值遠遠大於其他所監測的重金屬濃度，主要原因是自然水體中鈣的濃度比其他金屬要多得多，文獻資料(簡傳彬，2011)指出彰化地區灌溉水中鈣的平均濃度達 74.30 mg L^{-1} (見表3.3)，遠高於其他金屬離子濃度。因此，「陽離子樹脂縮時記錄膠囊」才会有吸附大量的鈣的現象。

細究「陽離子樹脂縮時記錄膠囊」吸附其他重金屬濃度平均數與中位數的資料發現，在鋅與銅這兩個重金屬呈現出差異性，兩者的平均值都遠大於自身的中位數。尤其在第1次(7天)的回收監測數據中最為明顯，其中，鋅的平均數為 111 mg kg^{-1} ，中位數僅為 7.25 mg kg^{-1} ；銅的平均數為 73.0 mg kg^{-1} ，中位數僅為 21.5 mg kg^{-1} 。根據統計大數法則的經驗說明，係因在監測過程中有特殊點位吸收大量重金屬導致兩者數據出現差異化的現象，見表5.9的A34點位重金屬鋅(1,171,112 cps)與重金屬銅(456,640 cps)的第1次XRF峰度值(cps)。

隨著監測時間的增加，當「陽離子樹脂縮時記錄膠囊」捕捉到環境水體中吸附其他重金屬的當下，如果沒有即時將該監測膠囊取出時，會因水體中其他目標元素(鈣)的競爭吸附導致所捕捉的重金屬濃度急遽下降。A34監測地點的水體中並無再額外提供大量重金屬鋅讓樹脂吸附，使得第2次(442,295 cps)與第3次(108,430 cps)的監測數據因水體中其他目標元素(鈣)的競爭吸附導致急遽下降的結果；無獨有偶，銅也有相同的現象，見表5.9。

表 5.6 「陽離子樹脂縮時記錄膠囊」現地監測結果敘述統計表(7 天)

	Ca	Ti	Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	Pb
	---mg kg ⁻¹ ---							
平均	43,392	3.0	26.44	91.3	37.6	73.0	111	3.37
中位數	46,209	1.6	25.83	70.6	34.2	21.5	7.25	2.43
標準偏差	19,205	4.8	6.49	139.1	18.0	614	1,203	7.01
最大值	74,264	38	95	1,678	184	7,306	14,288	81
最小值	3,250	0.00	20.76	26.4	21.6	14.8	0.0	0.0
樣本數(n)	141	141	141	141	141	141	141	141

表 5.7 「陽離子樹脂縮時記錄膠囊」現地監測結果敘述統計表(14 天)

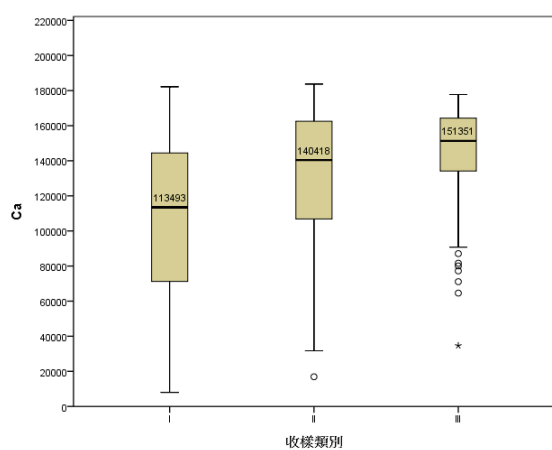
	Ca	Ti	Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	Pb
	---mg kg ⁻¹ ---							
平均	52,598	6.91	29.88	112.5	33.78	35.5	58.0	1.80
中位數	57,248	4.53	29.15	105.3	26.14	18.3	14.0	1.53
標準偏差	15,797	8.92	7.87	59.7	63.48	193.8	459	2.41
最大值	74,892	86	116	525	756	2,295	5,396	26
最小值	6,895	0.89	23.3	33.0	17.00	14.9	0.18	0.00
樣本數(n)	138	138	138	138	138	138	138	138

表 5.8 「陽離子樹脂縮時記錄膠囊」現地監測結果敘述統計表(21 天)

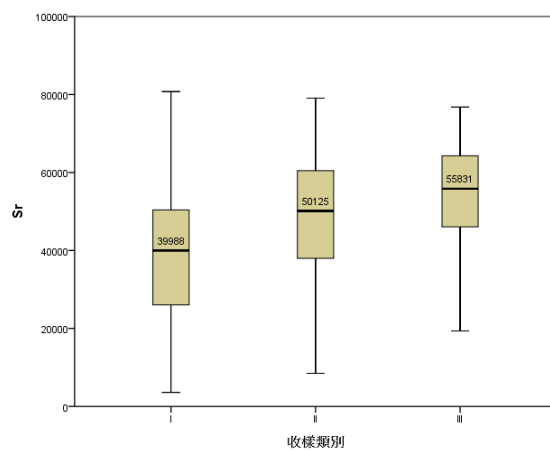
	Ca	Ti	Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	Pb
	---mg kg ⁻¹ ---							
平均	58,472	8.68	29.92	116.3	35.37	23.04	32.0	0.82
中位數	61,761	5.62	29.26	105.5	28.72	19.13	17.6	0.31
標準偏差	11,401	8.83	6.74	50.7	62.56	38.37	1,20.5	1.11
最大值	72,476	55.4	99.0	382	714	447	1,323	5.5
最小值	14,134	0.57	18.63	34.19	17.66	14.85	0.01	0.00
樣本數(n)	125	125	125	125	125	125	125	125

根據本研究計畫實驗設計內容，得知陽離子「樹脂縮時記錄膠囊」現地連續監測時間達 21 天(03/24~04/09)，共分 3 個梯次回收樣本；陰離子「樹脂縮時記錄膠囊」監測時間為 7 天(04/01~04/09)。針對目標元素在監測期間 I-Trax 的峰度值變化情形，結果說明如下：

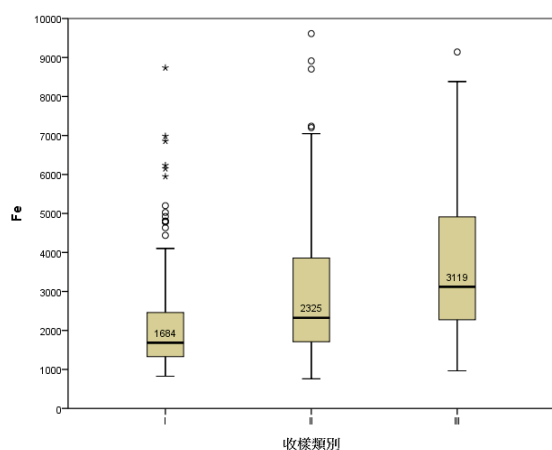
1. 隨著監測時間的增加，陽離子「樹脂縮時記錄膠囊」部分目標元素(Ca, Sr, Fe, Ti, Zn 與 Mn)I-Trax 峰度值的盒形圖(中位數)有增加的趨勢，如圖 5.31(a), 5.31 (b), 5.31 (c), 5.31 (d), 5.31 (e)與 5.31 (f)所示；其他元素(包含銅、鎳、鉛、砷與鉻)的中位數變化情況不明顯，如圖 5.31 (g), 5.31 (h), 5.31 (j), 5.31 (k)與 5.31 (l)所示。唯有鉀元素的中位數隨著監測時間的增加而有減少的趨勢(圖 5.31 (i))，係因水體中其他目標元素競爭吸附特性所導致。
2. 根據「陽離子樹脂縮時記錄膠囊」目標元素 I-Trax 的峰度值變化情形顯示，該值並無隨監測時間增加而有等比例增加的現象。以鈣為例(如圖 5.31(a))，連續 14 天監測的峰度值比連續 7 天監測的峰度值增加 23%；連續 21 天監測的峰度值也僅比連續 7 天監測的峰度值增加 33%；配合現場回收現況推測可能因素係因膠囊外觀遭懸浮顆粒或藻類滋生導致交換樹脂與水體間的接觸通量減少所致。
3. 「陰離子樹脂縮時記錄膠囊」係採用強鹼型交換樹脂(氯型)，由氯元素的 I-Trax 峰度值變化情形顯示(表 5.10)，初始峰度值為 70,359 cps，在監測 7 天後(監測時間係第 14 天至 21 天，計 7 天)，該樹脂中氯的峰度值減幅達 90%以上(約只剩 3,000 cps)，幾乎消耗殆盡。因此，**建議陰、陽離子「樹脂縮時記錄膠囊」連續監測時間以不超過 7 天為限。**



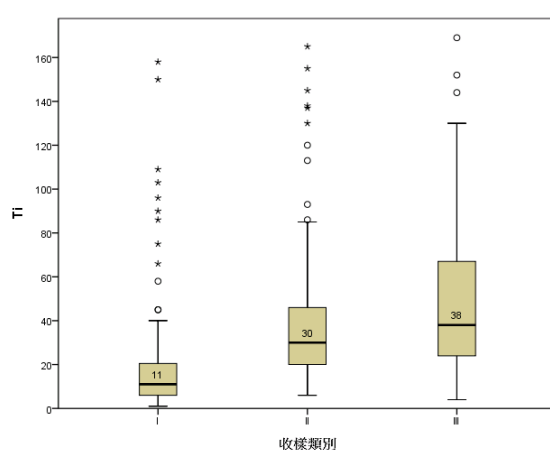
(a)



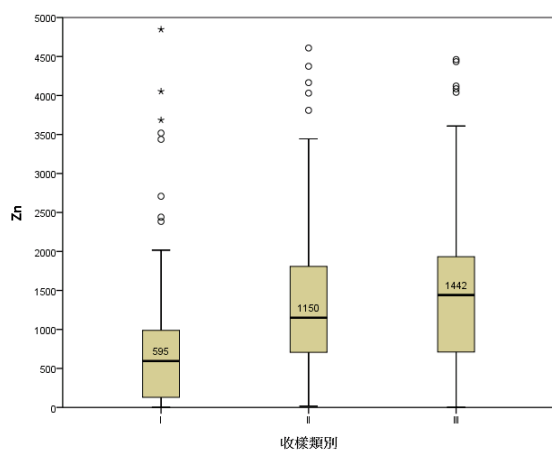
(b)



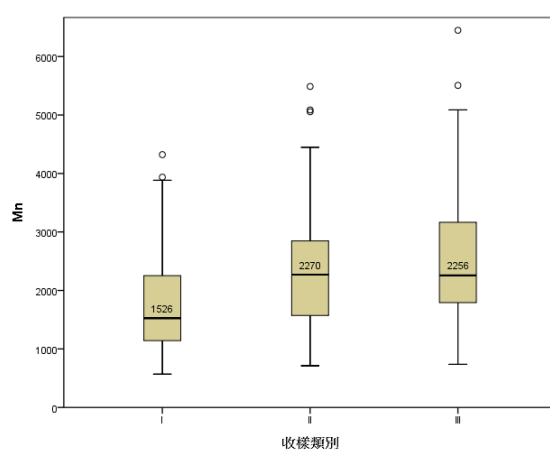
(c)



(d)



(e)



(f)

圖5.31 在不同收樣類別中其目標元素峰度值中位數盒形圖

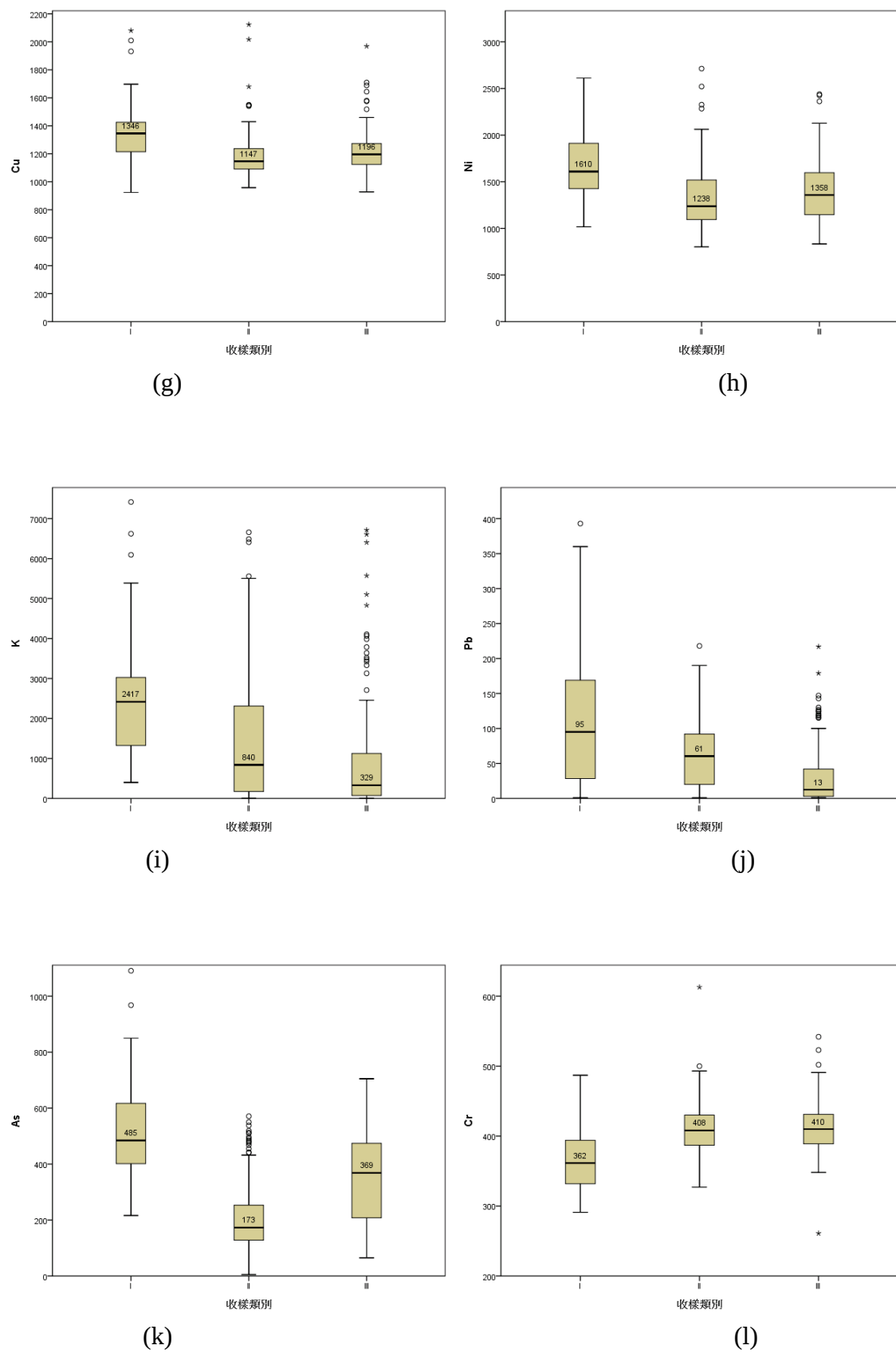


圖5.31 在不同收樣類別中其目標元素峰度值中位數盒形圖(續1)

4. 根據監測膠囊回收數據顯示，目標元素監測資料特性大致可以分成二類。第一類是隨著監測時間的累積，目標元素含量有增加的趨勢，肇因於水體中一直存在穩定含量，透過樹脂與水體接觸，讓交換形式持續進行，以鈣跟鋁最為明顯(如表 5.9)。第二類則是以人為形式(如工廠排放、農業施肥等)加諸於環境水體之中，會因為在特定時間與地點的大量排放，讓「樹脂縮時記錄膠囊」中特定目標元素突然快速增加，諸如錳、鐵、鎳、銅與鋅(如表 5.9 與表 5.10)。
5. 依本計畫監測膠囊所在地點的回收數據顯示，「樹脂縮時記錄膠囊」確實可以有效地達成計畫目標的要求。其中，「陽離子樹脂縮時記錄膠囊」A34 點位在第 1 週(監測時間為 7 天)就發現渠道水體有大量重金屬(錳、鐵、銅與鋅等，如表 5)存在的現象；A25 點位在第 2 週(監測時間為 14 天)出現渠道水體的重金屬含量(鐵、鎳與鋅等，如表 5.9)發生異常變化。其繫留作業與回收作業的現況照片見圖 5.32。
6. 「陰離子樹脂縮時記錄膠囊」的 A45 與 B29 點位在第一週(監測時間係第 14 天至 21 天，計 7 天)的渠道水體中有重金屬含量異常的蹤跡(錳、鐵、銅與鋅等，如表 5.10)，其繫留作業與回收作業的現況照片見圖 5.32。由陰離子樹脂的交換特性得知，其吸附之離子狀態應為陰離子，但是 XRF 檢測數據卻發現有其他重金屬陽離子存在，包含的元素有鈣、鉻、錳、鐵、鎳、銅與鋅等。推測可能原因係因為電鍍廢水中的鐵氰化合物($\text{Fe}(\text{CN})_6^{-3}$)與重金屬形成陰離子的錯離子而被該樹脂吸附導致。
7. 根據上述資料顯示，一旦有業者違法將汙染環境的廢棄汙水偷排至監測區域內，該區的「樹脂縮時記錄膠囊」能夠有效地紀錄水體中重金屬含量異常的情況。

重金屬監測離子交換樹脂縮時膠囊之設計研發

表5.9 陽離子空白樹脂(D00)與監測點位目標元素XRF峰度值異常一覽表

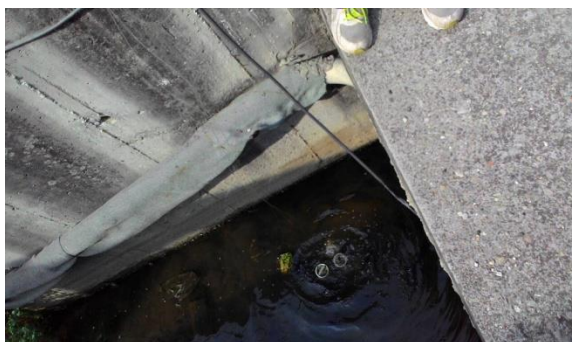
編號	K	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Sr	Pb	備註
A34	555	37,491	109	1,332	36,166	411,800	8,678	456,640	1,171,112	344	7,281	3,210	I(收樣類別)
	1,753	50,548	44	613	11,305	135,114	7,881	143,441	442,295	5	18,190	1,029	II(收樣類別)
	2,129	77,230	34	433	3,720	29,096	7,083	27,949	108,430	254	28,851	9	III(收樣類別)
A03	1,013	172,534	45	304	3,937	5,949	4,061	1,403	1,418	968	66,840	52	I(收樣類別)
	212	162,491	145	417	3,603	8,702	2,063	1,337	2,604	201	67,906	14	II(收樣類別)
	126	174,365	227	491	2,858	12,056	2,362	1,310	1,768	450	70,446	5	III(收樣類別)
A23	3,219	80,892	10	385	2,377	3,329	1,923	1,461	1,320	664	29,027	170	I(收樣類別)
	2,312	112,830	17	452	3,909	7,047	1,450	1,348	1,426	173	38,000	30	II(收樣類別)
	1,049	141,226	72	449	3,794	15,808	1,580	1,281	1,832	309	46,062	37	III(收樣類別)
A25	3,085	13,945	9	457	741	1,781	7,149	1,360	434	506	8,180	218	I(收樣類別)
	2,968	31,709	70	1,627	2,674	176,732	35,678	2,254	30,841	485	14,315	10	II(收樣類別)
	4,107	34,668	65	1,387	2,374	211,025	33,692	1,969	26,067	480	19,362	26	III(收樣類別)
A45	1,874	133,331	8	331	1,848	1,673	1,818	2,081	3,518	507	48,878	281	I(收樣類別)
	104	156,416	30	426	4,448	6,327	1,206	1,680	4,030	138	59,380	34	II(收樣類別)
	207	171,389	123	542	3,476	9,141	1,313	2,595	6,132	557	65,081	7	III(收樣類別)
B08	873	177,997	21	314	2,783	3,478	2,043	1,432	1,184	700	70,879	34	I(收樣類別)
	104	174,684	86	438	2,506	3,576	1,531	1,237	1,335	441	65,961	12	II(收樣類別)
	133	177,767	182	384	4,032	6,779	1,549	1,181	652	705	67,393	0	III(收樣類別)
C11	2,513	84,105	3	360	1,029	1,306	1,549	1,439	3,685	533	31,112	141	I(收樣類別)
	1,682	118,741	33	414	1,687	2,225	1,109	1,242	8,629	129	43,143	152	II(收樣類別)
	387	146,666	57	376	2,436	3,710	1,126	1,201	7,865	330	48,637	2	III(收樣類別)
C21	1,444	143,944	34	364	1,423	1,807	1,151	1,100	30	400	49,474	31	I(收樣類別)
	138	163,732	81	348	2,409	5,424	881	1,049	362	244	58,429	36	II(收樣類別)
	558	167,357	320	420	3,784	11,267	1,049	1,352	259	492	61,336	3	III(收樣類別)
D00	151	91	24	420	357	915	1,205	1,456	17	510	1	18	n=3(樣本數)

表5.10 陰離子空白樹脂(E00)與監測點位目標元素XRF峰度值異常一覽表

編號	S	Cl	K	Ca	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Sr	Br	備註
A27	15,146	5,319	72	179	722	560	9,040	5,113	2,647	2,570	76	725	8,951	
A28	18,094	4,213	5	382	1,053	827	11,517	2,349	2,857	2,103	530	537	9,949	
A45	14,581	3,878	509	1,843	1,068	4,176	26,357	2,529	10,256	4,761	68	903	7,344	
B06	15,518	2,840	236	383	764	1,216	7,556	2,144	3,589	755	132	779	5,438	
B29	14,866	2,604	813	665	1,077	2,118	24,105	2,444	4,702	1,183	451	607	5,402	
E00	564	70,359	99	82	386	287	731	1,641	1,728	0	374	3	122	n=3(樣本數)



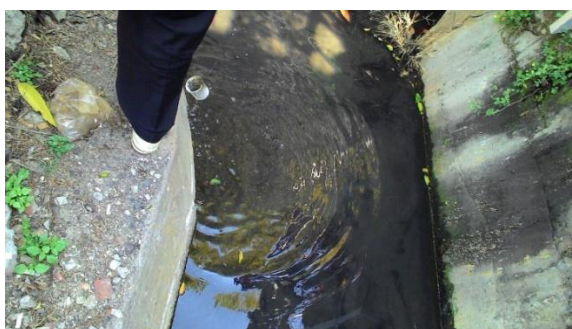
A34(繫留作業)



A34(回收作業)



A25(繫留作業)



A25(回收作業)



A45(繫留作業)



A45(回收作業)



B29(繫留作業)



B29(回收作業)

圖5.32 監測點位繫留作業與回收作業現場操作情況

5.5 SEM 與 EDS 分析

透過掃描式電子顯微鏡(Scanning Electron Microscope, SEM)的分析，比較「樹脂縮時記錄膠囊」的樹脂經由實驗室吸附試驗與野外現地監測結果後的變化，發現外觀顯著不同(如圖 5.33 所示)。進一步透過能量分散 X 光譜儀(Energy Dispersive Spectrometer, EDS)檢測兩者之間表面元素成分定性定量的結果得知其差異性明顯(如圖 5.34 所示)。

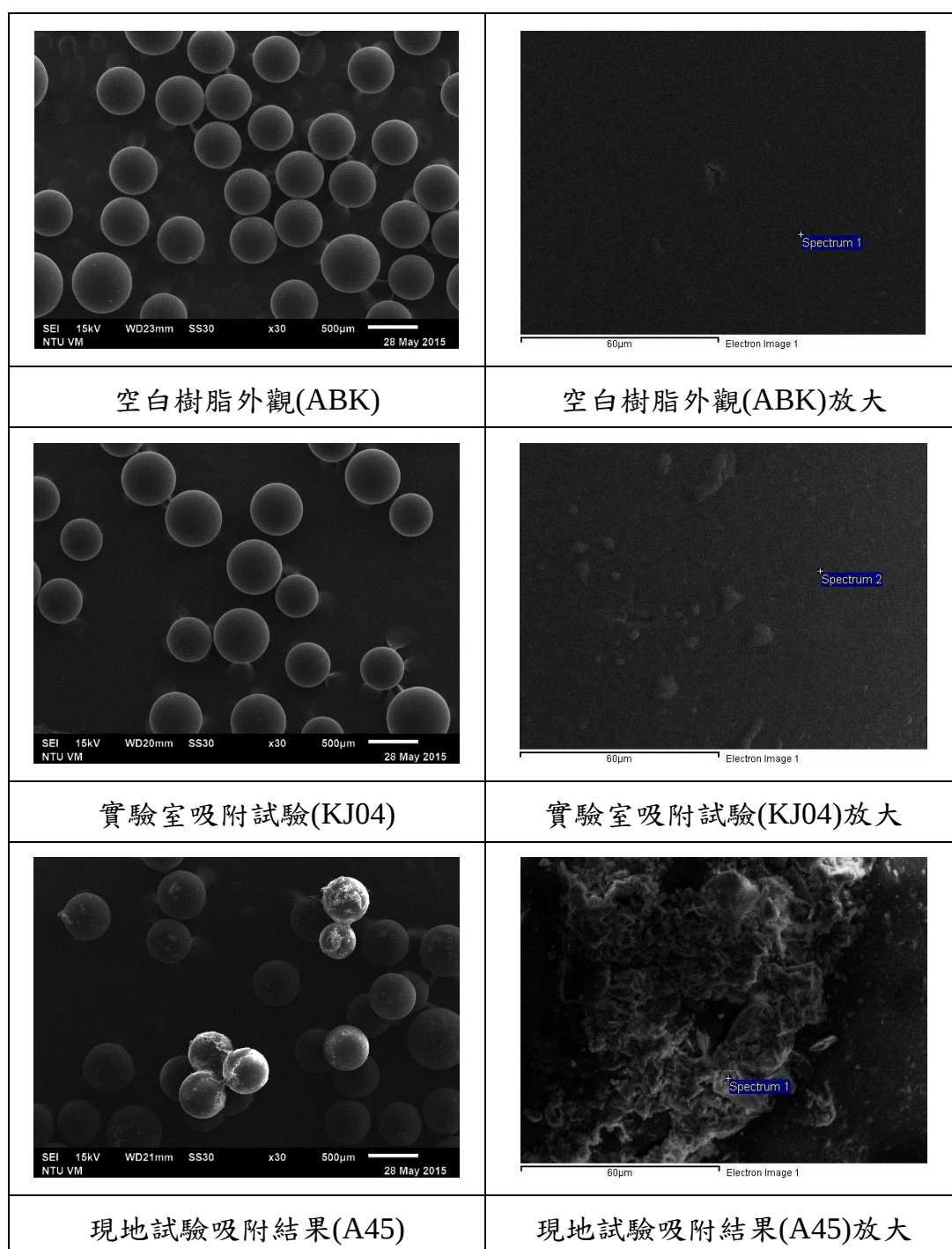


圖 5.33 陰離子交換樹脂 SEM 外觀顯示圖

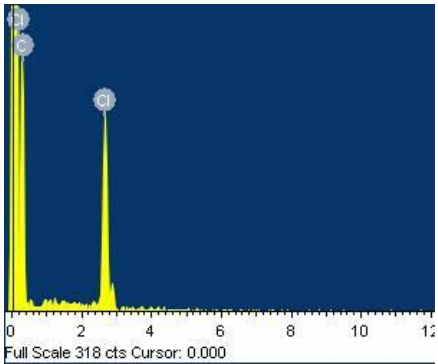
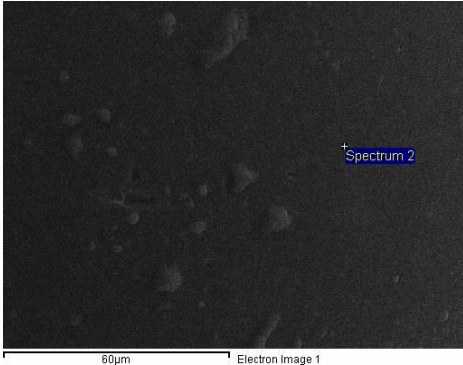
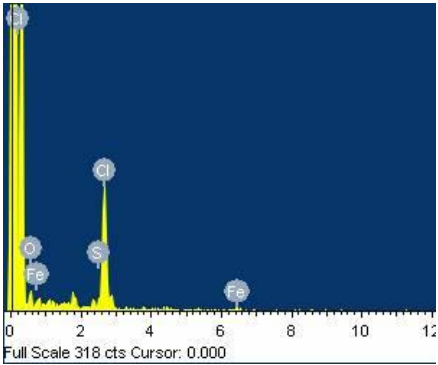
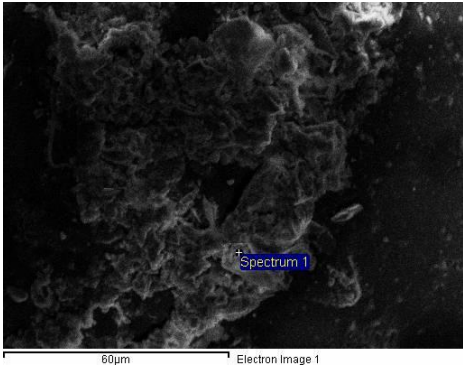
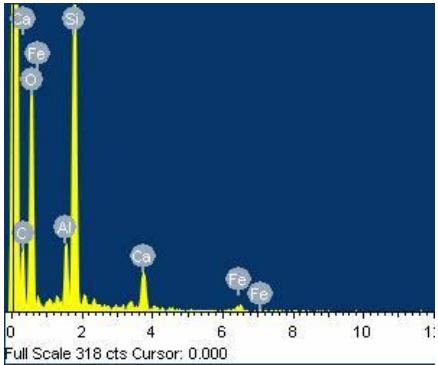
	
空白樹脂外觀(ABK)	空白樹脂外觀左圖放大
	
實驗室吸附試驗(KJ04)	
	
現地試驗吸附結果(A45)	點位 C25 (104.03.17)

圖 5.34 陰離子交換樹脂 EDS 外觀顯示圖

5.6 結論與建議

1. 本研究計畫以離子交換樹脂為基材已研發出「樹脂縮時記錄膠囊」，利用樹脂離子交換水中重金屬之快速及強大能力，將該膠囊放置於定點即可紀錄自投放至回收這段時間內排放(偷排)至環境水體中之重金屬。在現地監測資料結果(如 A34 點位,P72-P73)顯示當有汙染行為發生時，「樹脂縮時記錄膠囊」可鎖定廢水違法排放之區域，進一步提供政府相關稽查單位明確目標。
2. 本研究計畫現地試驗已完成「樹脂縮時記錄膠囊」投放與回收作業，說明如下：
 - (1) 在東西二、三圳灌溉區域監測點位計有 151 個，涵蓋面積約 8.8 平方公里。
 - (2) 總共放置 453 個陽離子樹脂膠囊與 30 個陰離子樹脂膠囊。
 - (3) 監測結束後，回收 404 個陽離子樹脂膠囊，回收率為 89.2%；陰離子樹脂膠囊則收回 28 個，回收率為 93.9%。
 - (4) 監測時間分為 3 種時段，分別是連續 7 天、連續 14 天以及連續 21 天。
3. 在實驗室樹脂吸附重金屬實驗中，根據數據分析結果說明如下：
 - (1) 樹脂包單純浸泡在含重金屬的水溶液中的吸附效率遠遠低於樹脂包置入杯瓶有轉速的情況。
 - (2) 針對同一濃度，杯瓶轉速越高(通量大)，陽離子交換樹脂的吸附效率越好。
 - (3) 除杯瓶實驗的低轉速與重金屬高濃度值外，其餘接觸時間達 30 分鐘，陽離子交換樹脂對重金屬的吸附效率可達 40%以上。
 - (4) 在相同轉速條件下，重金屬濃度的高低對吸附效率的影響並無顯著差異，原因是因為陽離子交換樹脂並無達到飽和現象，不會產生彼此競合的效果。
 - (5) 在高濃度條件下，雖然陽離子交換樹脂吸附效率不高，但是其吸附重金屬的總量並無減少，表示樹脂內重金屬單位濃度值持

續增加。

4. 在實驗室樹脂吸附重金屬實驗中，比較陽離子交換樹脂理論目標元素濃度值($\log_{10}$)與對應 XRF 檢測峰度值($\log_{10}$)的關係，發現兩者的線性相關係數(R^2)皆達 0.98 以上。樹脂所吸附的目標元素濃度中，以鈣的涵蓋範圍為最廣，介於 50~22,933 mg kg^{-1} 之間；其次是鋅，介於 18~7,518 mg kg^{-1} 之間。此一結果說明，XRF(台大地質系 I-Trax)在分析交換樹脂所含重金屬元素含量的準確性符合本計畫所需的要求。
5. 根據監測膠囊回收數據顯示，目標元素監測資料特性大致可以分成二類。第一類是隨著監測時間的累積，目標元素含量有增加的趨勢，肇因於水體中一直存在穩定含量，透過樹脂與水體接觸，讓交換形式持續進行，以鈣跟鋁最為明顯。第二類則是以人為形式(如工廠排放、農業施肥等)加諸於環境水體之中，會因為在特定時間與地點的大量排放，讓「樹脂縮時記錄膠囊」中特定目標元素突然快速增加，如錳、鐵、鎳、銅與鋅。
6. 依據實驗室樹脂吸附重金屬過程所需得時間顯示，「樹脂縮時記錄膠囊」在開放水體環境接觸到含重金屬的水溶液時，只要包覆交換樹脂的不織布或網狀聚酯纖維能夠維持水分子能自由進出監測包不受阻隔，即便接觸時間短暫，該膠囊一樣能夠紀錄水體環境中重金屬的變化趨勢。然現地環境因子影響複雜且多變，其他陽離子干擾、樹脂交換能力喪失、競爭吸附等因素對於「樹脂縮時記錄膠囊」之影響所在多有。因此，在實務上的可信度，僅能就較嚴重的汙染行為進行監測，並無法達到鎖定「樹脂縮時記錄膠囊」監測區域所有汙染源的要求。
7. 根據「陽離子樹脂縮時記錄膠囊」目標元素 I-Trax 的峰度值變化情形顯示，該值並無隨監測時間增加而有等比例增加的現象。透過現場回收現況推測可能因素係因膠囊外觀遭懸浮顆粒或藻類滋生導致交換樹脂與水體間的接觸通量減少所致；加上「陰離子樹脂縮時記錄膠囊」的氯濃度消耗速度判斷。建議陰、陽離子「樹脂縮時記錄膠囊」連續監測時間以不超過 7 天為限。

8. 由「陰離子樹脂縮時記錄膠囊」的樹脂交換特性得知，其吸附之離子狀態應為陰離子，但是本計畫在 XRF 檢測數據卻發現有其他重金屬陽離子存在的現象，包含的元素有鈣、鉻、錳、鐵、鎳、銅與鋅等。推測可能原因係因為電鍍廢水中的鐵氰化合物($\text{Fe}(\text{CN})_6^{-3}$)與重金屬形成陰離子的錯離子而被該樹脂吸附導致。
9. 透過掃描式電子顯微鏡(Scanning Electron Microscope, SEM)的分析，比較「樹脂縮時記錄膠囊」的樹脂經由實驗室吸附試驗與野外現地監測結果後的變化，發現外觀顯著不同。進一步透過能量分散 X 光譜儀(Energy Dispersive Spectrometer, EDS)檢測兩者之間表面元素成分定性定量的結果得知其差異性明顯。
10. 「樹脂縮時記錄膠囊」的優點是監測成本低廉、效率高、即時連續監測與分析快速等，再者其紀錄污染源排放的敏感度(重金屬濃度)與位置(固定地點)遠高於對水樣與底泥採樣所能反應的現況，是針對提供夜間、假日或間歇性等偷排行為的科學證據的一大利器。

六、參考文獻

1. 王玉芬和胡筱敏(2006)，黃河萬家寨斷面水質安全分析，中國安全科學學報，第16卷第1期，第5-9頁。
2. 朱海鵬、章莉菁、吳文娟(1992)，台灣地區土壤重金屬含量現況之分析及探討，第三屆土壤污染防治研討會論文集，第 1-14 頁。
3. 行政院環境保護署(2014)，民國 102 年環境水質監測年報。
4. 行政院環境保護署 (2007)，河川污染統計 (<http://edw.epa.gov.tw/topicWater.aspx>)，環境品質資料倉儲系統。
5. 行政院環境保護署(1990)，台灣地區土壤重金屬含量調查總報告。
6. 李俊奎(2006)，螯合交換樹脂處理含銅(II)與鎳(II)工業廢水，私立元智大學化學工程與材料科學研究所碩士論文。
7. 林惠嬌(2003)，河川指標污染物及水體分類水質標準之探討，國立台灣大學公共衛生學院環境衛生研究所碩士論文。
8. 徐玉標、張文亮、劉玉雪、李寶鐘、吳波霖(1993)，本省嚴重污染灌溉區土壤作物與地下水之惡化調查—彰化水利會東西二渠灌區，農委會水污染試驗研究報告系列 1，農業工程研究中心。
9. 莊家維(2007)，後勁溪污染潛勢與流域水質調查評估研究，國立高雄海洋科技大學海洋環境工程研究所碩士論文。
10. 張尊國(2010)，彰化農地污染之環境資料蒐集與污染關聯性分析計畫，行政院環境保護署。
11. 張珮綺(2001)，改善灌溉水質受污染之措施研究，私立中原大學土木工程學研究所碩士論文。
12. 葉正華(1988)，吸附分離過程基礎，北京:化學工業出版社，第 1-16 頁。
13. 黃信慈(2008)，灰色多目標規劃應用在河川水污染防治策略之研究，私立逢甲大學環境工程與科學研究所碩士論文。

14. 劉淑惠(2009)，設置高雄生態水系廊道策略研究，高雄市政府研究發展考核委員會委託研究。
15. 劉黔蘭(1998)，電鍍廢水汙染土壤，土壤與環境，第1卷第2期，第161-169頁。
16. 簡傳彬(2011)，農業回歸水暨餘水再利用可行性研究－以彰化地區為例，行政院經濟建設委員會，委託研究計畫案號：99060403。
17. 謝炳輝、楊定恭、吳國榮(1999)，台灣地區河川水質監測整合方向，第六屆海峽兩岸環境保護研討會論文集，第84-89頁。
18. 蘇水龍(2012)，河川復育之生物評估－以二仁溪污染整治計畫為例，長榮大學健康科學學院職業安全與衛生學研究所碩士論文。
19. 謝心色(2011)，灌排系統污染管制策略之成本效益分析－以彰化縣東西二圳重金屬污染管制為例，國立中興大學環境工程學研究所碩士論文。
20. Ansari, R., & Fahim, N. K. (2007). Application of polypyrrole coated on wood sawdust for removal of Cr(VI) ion from aqueous solutions. *Reactive and Functional Polymers*, 67, 367-374.
21. Alloway, B. J. (1990) Heavy metals in soils. John Wiley & Sons, Inc. New York.
22. Donia, A. M., Atia, A. A., El-Boraey, H., & Mabrouk, A. D. H. (2006). Uptake studies of copper(II) on glycidyl methacrylate chelating resin containing Fe₂O₃ particles. *Separation and Purification Technology*, 49, 64-70.
23. Eom T.H., Lee C.H., Kim J.H. and Lee C.H. (2005). Development of an ion exchange system for plating wastewater treatment. *Desalination*, 180, 163-172.
24. Gode, F., Pehlivan, E., 2006. Removal of chromium (III) from aqueous solutions using Lewatit S 100: the effect of pH, time, metal concentration and temperature. *J. Hazard. Mater.* 136, 330-337.
25. Juang, R. S.; Wang Y. C. (2003) Ligand-enhanced separation of divalent heavy metals from aqueous solutions using a strong-acid ion-exchange resin. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 42, 1948-1954.

26. Kang, S. Y.; Lee, J. U.; Moon, S. H.; Kim, K. W. (2004). Competitive adsorption characteristic of Co^{2+} , Ni^{2+} and Cr^{3+} by IRN77 cation exchange resin in synthesized wastewater. *Chemosphere*, 56, 141-147.
27. Liang F.B., Song Y.L., Huang C.P., Li Y.X. and Chen B.H. (2013). Synthesis of novel lignin-based ion-exchange resin and its utilization in heavy metals removal. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 52, 1267–1274.
28. Manuel, C., Jolanta W., Antonio de L. and Juan F. R. (2008). Ion-exchange equilibria of Pb^{2+} , Ni^{2+} , and Cr^{3+} ions for H^+ on amberlite IR-120 resin. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 53, 1325–1331.